

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Лисенко О.М.
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ _____ ” _____ 20__ р.

Київ - 2019 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Факультет електроніки

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

Спеціальність 6.050902 РАДІОЕЛЕКТРОННІ АПАРАТИ
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Лисенко О.М.
(підпис) (прізвище ініціали)

« ____ » _____ 20 __ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

_____ Сахарова Дмитра Юрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Тепловізійний пристрій

керівник проекту Антонюк Олександр Ігорович, старший викладач

затверджені наказом по університету від 27.05.2019 року №1405с

2. Термін подання студентом проекту 10 червня 2019 року

3. Вихідні дані до проекту. Портативний тепловізійний пристрій. Пристрій належить до області температурних вимірювань, націлений на допомогу у виявленні теплових витоків та порушенні у теплоізоляції будівель.

- здатність системи виступати головним блоком у побудові тепловізійного пристрою;
- високий запас надійності системи;
- здатність системи працювати при температурних умовах, вище нормальних;
- пристрій має виконувати цифрову обробку результатів вимірювань.

До основного функціоналу системи можна віднести:

- отримання даних з інфрачервоної матриці;
- отримання зображення з оптичного сенсору;
- розрахунок температури об'єктів у полі зору обох сенсорів;
- накладання зображень обох сенсорів;
- вивід зображення на зовнішній дисплей.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- аналіз технічного завдання;
- огляд існуючих тепловізійних пристроїв, патентний пошук;
- обґрунтування вибору елементної бази та друкованої плати;
- розробка схеми електричної принципової;
- розміщення компонентів на друкованій платі блока керування;
- конструкторсько-технологічні розрахунки;

- електричний розрахунок друкованої плати блока керування;
- розрахунок надійності друкованої плати блока керування;
- розрахунок віброміцності друкованої плати;
- проектування у Altium Designer;
- написання моделей обробки даних та окремих функціональних блоків;
- висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо):

- схема електрична принципова блока керування;
- друкована плата блока керування;
- складальне креслення друкованої плати блока керування.
- Варіант корпусу

6. Дата видачі завдання 16.03.19

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

<i>№ з/п</i>	<i>Назва етапів виконання Дипломного проекту</i>	<i>Термін виконання етапів проекту</i>	<i>Примітка</i>
1	Аналіз технічного завдання	16.03.19-26.03.19	виконано
2	Вибір елементної бази та друкованої плати	26.03.19-02.04.19	виконано
3	Схемо-технічне проектування	02.04.19-09.04.19	виконано
4	Виконання креслень схеми електричної принципової	09.04.19-23.04.19	виконано
5	Конструкторсько-технологічні розрахунки	23.04.19-30.04.19	виконано
6	Електричний розрахунок друкованої плати	30.04.19-07.05.19	виконано
7	Розрахунок віброміцності друкованої плати	07.05.19-14.05.19	виконано
8	Проектування у Altium Designer	14.05.19-21.05.19	виконано
9	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	21.05.19-28.05.19	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	28.05.19-12.06.19	виконано

Студент _____ Сахаров Д.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Антонюк О.І.

_____ (підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація

Роботу викладено на 70 сторінках, вона містить 5 розділів, 25 ілюстрацій, 16 таблиць та 38 джерел в переліку посилань.

Об'єктом роботи став малогабаритний портативний апаратний комплекс для виявлення пошкоджень у теплоізоляції будівель. Комплекс належить до температурних вимірювачів та пристроїв фіксації випромінювань у інфрачервоному діапазоні.

Предмет роботи — спосіб реєстрації випромінювання у інфрачервоному діапазоні, розробка відповідного апаратного забезпечення для отримання та обробки даних.

Метою даної роботи є створення пристрою, який буде теплову мапу об'єктів, що знаходяться у зоні дії інфрачервоного сенсору.

У ході роботи зроблено пошук існуючих рішень тепловізійних пристроїв, сформовано уявлення про конструктивні та структурні рішення, характеристики та параметри пристрою, що буде розроблятися в рамках дипломного проектування. Розроблено структурну схему, виконано підбір елементів, розроблено схему електричну принципову. Зроблено аналіз класів точності, типів та матеріалів друкованої плати, оптимального розташування елементів на друкованій платі. Виконані розрахунки, що підтверджують правильність конструкторського рішення, розраховано ресурс блоку керування. Розроблена модель обробки даних з сенсору з використанням середовища Matlab, описано алгоритм інтерполяційного ядра на мові програмування C++.

Згідно теми дипломного проекту було виконано впровадження розробки на базі ФОП Сахаров Д.Ю. Також було зроблено публікацію по темі даного дипломного проекту на XVIII Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка».

Ключові слова — інфрачервоне випромінювання; програмована логічна інтегральна схема; інфрачервоний сенсор.

Summary

The work is presented on 70 pages, it contains 5 sections, 25 illustrations, 16 tables and 38 sources in the list of references.

The object of this work is portative hardware solution for determining damages and flaws in the insulation of buildings. This solution refers to temperature measuring devices and devices for fixing radiation in the infrared range.

Subject of work – a method of registration of radiation in the infrared range, the development of appropriate hardware for receiving and processing data.

The purpose of this work is to create a device that builds a thermal map of objects located in the area of the infrared sensor.

In the course of this work the search of existing solutions of thermal imaging devices was made, the conception of structural elements and solutions were observed. Characteristics and parameters of the device, which will be developed as part of the diploma design, has been formed. A structural scheme has been developed, an electrical principle circuit has been developed. The analysis of classes of accuracy, types and materials of a printed circuit board, optimal arrangement of elements on a printed circuit board were made. The calculations, confirming the correctness of the design decision, are calculated, the resource of the control block is calculated. A model for processing data from a sensor using the Matlab environment is developed, the interpolation kernel algorithm is described in the C ++ programming language.

According to the topic of this diploma project, implementation of the development on the basis of PE Dmytro Sakharov was carried out. There was a publication on the topic of this diploma project at XVIII All-Ukrainian scientific conference of young scientists and students "Scientific developments of youth at the present stage", subsection "Electrical engineering and electronics".

Keywords – infrared radiation; programmable logic integrated circuit; infrared sensor; field-programmable gate array.

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: **Тепловізійний пристрій**

Київ – 2019 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів.....	3
ВСТУП.....	4
Розділ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПАТЕНТНИЙ ПОШУК.....	6
1.1 Аналіз принципу роботи тепловізійних пристроїв	6
1.2 Вивчення аналогів	6
1.3 Загальні теоретичні відомості	8
Висновок до розділу.....	12
Розділ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ.....	13
2.1 Розробка структурної схеми та принцип роботи модулю	13
2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази	13
2.3 Розробка та розрахунок схеми електричної принципової.....	19
Висновок до розділу.....	27
Розділ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА.....	28
3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати.	28
3.2 Вибір класу точності друкованої плати.....	30
3.3 Вибір методу виготовлення друкованої плати	32
3.4 Розміщення компонентів та трасування ДП	33
Висновок до розділу.....	33

					ДК52.201152.001 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Тепловізійний пристрій Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркциів
Розробив		Сахаров Д.Ю.					1	
Перевірив		Ярошенко М.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затвердив		Антонюк О.І.						
						НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», ФЕЛ, гр. ДК-52		

Розділ 4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ

КОНСТРУКТОРСЬКОГО РІШЕННЯ35

4.1 Виконання конструкторсько-технологічного розрахунку елементів друкованого монтажу.....	35
4.2 Температурний розрахунок елемента із найбільшою потужністю	39
4.3 Електричний розрахунок друкованої плати.....	41
4.4 Розрахунок віброміцності друкованого вузла	43
4.5 Розрахунок надійності друкованого вузла	46
4.6 Оцінка тривалості роботи від акумулятору	53
Висновок до розділу.....	53

Розділ 5 ПРОЕКТУВАННЯ У САПР ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ

ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ.....55

5.1 Проектування друкованого вузлу в Altium Designer	55
5.2 Алгоритми обробки даних та моделювання функціональних блоків	56
Висновок до розділу.....	62

ВИСНОВКИ 64

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ..... 67

Додаток А – Технічне завдання	71
Додаток Б – Програмна реалізація контролера MLX90640 (STM32).....	76
Додаток В – Matlab код моделі інтерполяції (дані з Serial)	79
Додаток Г – C++ реалізація алгоритму бікубічної інтерполяції	80
Додаток Д – Кольорові зображення термограмм.....	84
Додаток Е – Акт впровадження	85
Додаток Ж – Участь у конференціях	86
Додаток И – Тепловізійний пристрій. Перелік елементів.....	88
Додаток К – Специфікація.....	91

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема

ПЛМ – програмована логічна матриця

FPGA – field-programmable gate array

FIR – far infrared radiation

ДП – друкована плата

ДМ – друкований монтаж

ДВ – друкований вузол

КЕ – конструктивні елементи

МК – мікроконтролер

ПМ – посадкове місце

ПЗ – програмне забезпечення

САПР – система автоматизованого проектування.

УГП – умовно-графічне позначення

ІЧ – інфрачервоний

EEPROM – electrically erasable programmable read-only memory

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ІС – інтегральна схема

ASIC – application-specific integrated circuit

PLL – phase-locked loop

ВСТУП

Тепловізійне бачення використовується в різних сферах – комунальні та енергетичні компанії використовують його для того, щоб виявити порушення у теплоізоляції будинків, локалізувати витоки тепла через тріщини дверей і вікон. Поліцейські вертольоти використовують його для пошуку підозрюваних вночі. Метеостанції використовують теплові камери для відстеження буревіїв і ураганів. Тепловізійні пристрої використовуються також в медичній сфері для діагностики різних розладів і захворювань.

Теплові камери з деякою точністю фіксують температуру різних об'єктів у кадрі, а потім призначають кожній температурі відтінок кольору, який дозволяє побачити, скільки тепла об'єкт випромінює в порівнянні з іншими об'єктами навколо нього. Більш низькій температурі часто відповідає відтінок синього, пурпурового або зеленого кольору, тоді як більш високій температурі може бути призначений відтінок червоного, помаранчевого або жовтого кольору. Деякі теплові камери використовують градації сірого для представлення теплового зображення [1].

Проблема попередження теплових втрат, внаслідок порушень теплоізоляційних характеристик будівель є дуже гострою на сьогодні, оскільки ціна на опалювання невинно збільшується [2].

У державі на опалення приміщень витрачається приблизно четверта частина палива, яке споживається в країні, при цьому 80% його йде на обігрів житлових будинків. Найбільша частина від усіх теплових втрат у житлових будинках – через вікна та стіни. Зимою також можна побачити, як на дахах деяких будинків відсутня снігова шапка, навіть після значного снігопаду. Тобто частина енергії, що споживається для опалення приміщень просто йде на розтоплення снігу [3].

Існує проблема доступності тепловізійних пристроїв для рядового населення, через відносно високу вартість таких пристроїв. Розв'язання проблеми доступності могло б привести до того, що кожен міг би стати більш обізнаним у питаннях енергоефективності. Це дало б змогу кожному споживачеві

					<i>ДК52.201152.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

комунальних послуг оптимально використовувати ресурси, економлячи таким чином власні кошти. У масштабі регіонів та цілої країни, це знизило б навантаження на електростанції та котельні.

У рамках дипломного проектування було проаналізовано існуючі рішення та алгоритми, що дозволяють покращити точність вимірювання температур та розрізнення об'єктів у полі зору тепловізійних пристроїв.

Щоб розрізняти об'єкти у кадрі та локалізувати витoki тепла, у тепловізора має бути достатньо велика роздільна здатність. Задача полягає у розробці блоку керування тепловізора, для забезпечення достатньої точності вимірювання температур та такої роздільної здатності, яка б дозволяла досягнути мети локалізації теплових витоків та порушень теплової ізоляції будівель.

Новизною даного проекту є використання новітньої елементної бази, зокрема, програмованих логічних матриць для отримання та обробки даних, реалізації апаратних алгоритмів інтерполяції та накладання. Такий підхід дозволяє проводити модернізацію алгоритмів обробки даних, не змінюючи схемотехнічне рішення пристрою.

Згідно теми дипломного проекту було виконано впровадження розробки на базі ФОП Сахаров Д.Ю. Також було зроблено публікацію по темі даного дипломного проекту на XVIII Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка».

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

Розділ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПАТЕНТНИЙ ПОШУК

1.1 Аналіз принципу роботи тепловізійних пристроїв

Інфрачервоне випромінювання – електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоною границею видимого світла з довжиною хвилі $\lambda = 700$ нм (частота близько 430 ТГц). Інфрачервоне випромінювання також називають «тепловим випромінюванням», у зв'язку із залежністю його спектру та інтенсивності від температури а також, сприйняттям його шкірою людини, як відчуття тепла. Довжини хвиль, що випромінюються тілом, залежать від температури нагрівання: чим вищою є температура, тим коротша довжина хвилі та вища інтенсивність випромінювання [4].

Тепловізійні пристрої працюють за принципом конвертації невидимого для ока людини теплового діапазону у видимий, у так звані «псевдо-кольори». Кольори, які в результаті будуть відображені на тепловізійній мапі (так називається зображення з теловізору) залежать від кольорової палітри, що застосовується. Так, у класичній кольоровій палітрі, що часто застосовують, більш низькі температури часто дають відтінок синього, пурпурового або зеленого кольору, тоді як більш високій температурі може бути призначений відтінок червоного, помаранчевого або жовтого кольору. Також використовують палітру градацій сірого, де більш високі температури зображуються світлими областями, ближчі до білого, а більш низькі – темнішими, ближчими до чорного.

Реєстрація теплового випромінювання здійснюється за допомогою FIR-пікселів. Більш якісні тепловізори мають також оптичну камеру, яка дозволяє накласти теплову мапу на контури об'єктів у кадрі.

1.2 Вивчення аналогів

Так як цільове призначення тепловізору, що розробляється – відстеження теплових витоків у термоізоляції будівель та детектування неправильного

температурного режиму у роботі приладів, ми не будемо розглядати моделі надпотужних військових чи медичних тепловізорів. Варто виділити основні характеристики, які мають тепловізори: діапазон вимірюваної температури, похибка вимірювань, термічна чутливість та роздільна здатність інфрачервоної матриці (кількість FIR пікселів), частота оновлення зображення, спосіб відображення теплової мапи (вбудований дисплей, екран смартфона, тощо). Також важливою характеристикою є наявність оптичної камери (камери видимого діапазону) для здійснення накладання тепловізійної мапи на контури об'єктів у кадрі звичайної камери.

Першим розглянутим пристроєм тепловізійного бачення є «Flir One Pro LT», виконаний у форм-факторі аксесуару для смартфона. Діапазон вимірюваної температури – від -20 до 120 °С, похибка вимірювань $\pm 3,0$ °С, термічна чутливість 0,1 °С. Роздільна здатність 80 на 60 пікселів, частота оновлення зображення – 8,7 Гц, має камеру для видимого діапазону світла. Пристрій підключається роз'ємом USB type-C, або Apple Lightning. Така реалізація одночасно має свої переваги та недоліки: смартфони нині дуже розповсюджені, та стали буденною річчю, проте пристрій позбавлений статусу самостійного, незалежного апарату. Також пристрій має малий діапазон температур, та велику похибку вимірювань.

Наступною розглянутою моделлю є «Flir E4», тепловізор для енергоаудиту, з діапазоном вимірюваної температури від -20 до 250°С, похибка вимірювань $\pm 2,0$ °С, термічна чутливість 0,15 °С. Роздільна здатність матриці 80 на 60 пікселів, частота оновлення зображення – 9 Гц, має камеру для видимого діапазону світла. Цей пристрій є самодостатнім, має вбудований екран, проте велику вартість відносно інших розглянутих моделей.

Третя модель – «Xintest НТ-175», теж призначена для енергоаудиту. Роздільна здатність матриці – 32 на 32 пікселі. Діапазон вимірюваної температури – від -20 до 300 °С, похибка вимірювань $\pm 2,0$ °С, термічна чутливість 0,5 °С, частота оновлення зображення – 6 Гц. Пристрій є найдешевшим серед розглянутих, але теж має низку недоліків, серед яких: мала частота оновлення

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

зображення, мала роздільна здатність, та менша, у порівнянні з іншими, термічна чутливість. Також у пристрої відсутня оптична камера, що ускладнює ідентифікацію об'єктів у кадрі.

Детальний аналіз аналогів допоміг у виборі елемента бази та підходів, що будуть використовуватись у розробці корисної моделі в рамках дипломного проектування, а саме: форм-фактором вирішено обрати самостійний пристрій, як у моделях Flir E4 та Xintest HT-175, також було прийнято рішення використовувати оптичну камеру, щоб накладати зображення видимого людині спектру на тепловізійну мапу, отриману з інфрачервоної матриці.

Патентний пошук на ресурсі [5] від компанії «World Intellectual Property Organization», показав, що компанією FLIR Systems AB у патенті US20190147569 було запатентовано метод оптимізації накладання зображення з інфрачервоного сенсору та сенсору видимого світла (оптичної камери) [6]. Звідси маємо ще одну вимогу до подальшої розробки функціональних блоків всередині ПЛІС – ретельно вивчити патент та використати інший метод для накладання зображень, щоб запобігти правовим колізіям.

1.3 Загальні теоретичні відомості

1.3.1 Масштабування зображень

Масштабування зображення – зміна розміру зображення зі збереженням його пропорцій. Під масштабуванням мається на увазі як збільшення («апскейлінг»), так і зменшення («даунскейлінг») роздільної здатності зображення. Широко застосовується в комп'ютерній графіці, обробці відео, зокрема, реалізується на апаратному рівні в телевізорах і відеопрогравачах [7].

В залежності від типу графіки (растрова, векторна), масштабування проводиться різними алгоритмами. Масштабування векторних зображень відбувається без втрат якості зображення, при збільшенні растрових може відбуватися втрата якості зображення: можливі суттєві викривлення геометрії дрібних деталей і поява помилкових візерунків на структурах. Тому при

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

масштабуванні растрових зображень використовуються спеціалізовані алгоритми, що згладжують небажані ефекти. Визначення значень проміжних пікселів інтерполюється [8].

Інтерполяція — в обчислювальній математиці спосіб знаходження проміжних значень величини за наявним дискретним набором відомих значень [9].

Багатьом із тих, хто стикається з науковими та інженерними розрахунками часто доводиться оперувати наборами значень, отриманих експериментальним шляхом чи методом випадкової вибірки. Як правило, на підставі цих наборів потрібно побудувати функцію, зі значеннями якої могли б з високою точністю збігатися інші отримувані значення. Така задача називається апроксимацією кривої. Інтерполяцією називають такий різновид апроксимації, при якій крива побудованої функції проходить точно через наявні точки даних.

Кубічні сплайни Ерміта — кубічні сплайни, що використовують інтерполювання поліномами методом Ерміта. Цей метод інтерполювання використовує дві контрольні точки та два вектори напрямків.

Кубічні поліноміальні сплайни широко використовуються у галузі комп'ютерної графіки та геометричного моделювання для отримання кривих або траєкторії руху, що проходять через задані точки площини або тривимірного простору.

Кубічні сплайни Ерміта мають чотири контрольні точки, але те, як використовуються контрольні точки, трохи відрізняється від очікуваних. Сама крива проходить тільки через дві контрольні точки, а кінцеві контрольні точки допомагають обчислити тангенс у середніх контрольних точках. Така крива зветься кривою Безье. На рисунку 1.1, кубічна крива Безье проходить через точки P_0 та P_3 , а точки P_1 та P_2 слугують для напрямку руху.

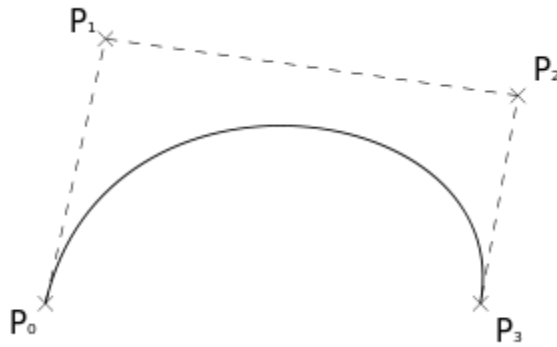


Рисунок 1.1 – Кубічна крива Безьє

1.3.2 Програмовані логічні інтегральні схеми

ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема - електронний прилад, що використовується для створення цифрових логічних функцій, не вдаючись до створення самостійної інтегральної схеми. На відміну від традиційних цифрових мікросхем, логічна функція ПЛІС не визначається при виготовленні, а задається за допомогою програмування (конфігурації). Для цього використовуються програматори і середовища розробки, що дозволяють задати бажану структуру цифрового пристрою у вигляді логічної схеми або дискретивної програми на спеціальних мовах опису апаратури (Verilog, VHDL та інші) [10].

FPGA - саме той тип ПЛІС, який використовується в проекті. Даний тип містить блоки множення - накопичення, які широко використовуються при цифровій обробці сигналів, а також логічні елементи (як правило на базі таблиць істинності) та блоки комутації. FPGA зазвичай використовуються для обробки сигналів, вони мають більше логічних елементів та гнучкішу архітектуру, ніж CPLD (complex programmable logic device - складні програмовані логічні пристрої).

Програма для FPGA зберігається в розподіленій пам'яті, яка може бути як енергозалежною – у цьому випадку програма не зберігається при зникненні електроживлення мікросхеми, так і на основі енергонезалежних комірок Flash-пам'яті - в цьому випадку програма зберігається при зникненні електроживлення.

1.3.3 Протокол I²C

I²C є послідовним протоколом двопровідного інтерфейсу для підключення низькошвидкісних пристроїв, таких як мікроконтролери, EEPROM, АЦП ЦАП, інтерфейси вводу-виводу та інші аналогічні периферійні пристрої в вбудованих системах. Він був розроблений компанією Philips і в даний час використовується практично всіма основними виробниками IC. Кожен ведений пристрій I²C має свою адресу, яку встановлює компанія NXP (раніше Philips).

I²C використовує тільки два провідника: SCL (синхросигнал) і SDA (послідовні дані). Обидва повинні бути підтянуті резисторами до напруги живлення.

Базова комунікація I²C використовує передачу восьми біт даних. Кожний ведений пристрій I²C має 7-бітову адресу, яка має бути унікальною на шині. Деякі пристрої мають фіксовані адреси I²C, в той час як інші мають регістр, що визначає адресу (зазвичай, молодші біти). Існують також пристрої, які мають 10-бітову адресу, яку допускає специфікація [11].

У фазі адреси, ведучий пристрій передає 7 біт адреси (старший біт попереду), а наймолодший біт у байті, що передається, використовується для сигналу читання або запису в пристрій. Якщо біт 0 (в адресному байті) встановлений в 1, то ведучий пристрій зчитуватиме дані з веденого пристрою I²C.

Ведучий пристрій генерує сигнал синхронізації (SCL) і доступається до окремих пристроїв I²C.

Нормальний стан обох ліній (SCL і SDA) – високий логічний рівень, що забезпечується підтягуючими резисторами. Зв'язок ініціюється ведучим пристроєм. Він генерує початкову умову (start condition), після якої йде адреса веденого пристрою (рисунк 1.2). Якщо нульовий біт адресного байта був встановлений в 0, ведучий пристрій записуватиме байт у ведений пристрій. В іншому випадку наступний байт буде зчитуватися з веденого пристрою. Як тільки всі байти зчиталися або записалися, ведучий пристрій генерує умову зупинки (stop condition). Це сигналізує іншим пристроям на шині, що зв'язок закінчився, та

інший пристрій може використовувати шину (у випадку декількох ведучих пристроїв) [12].

Будемо використовувати цей протокол для комунікації з ІЧ матрицею MLX90640.

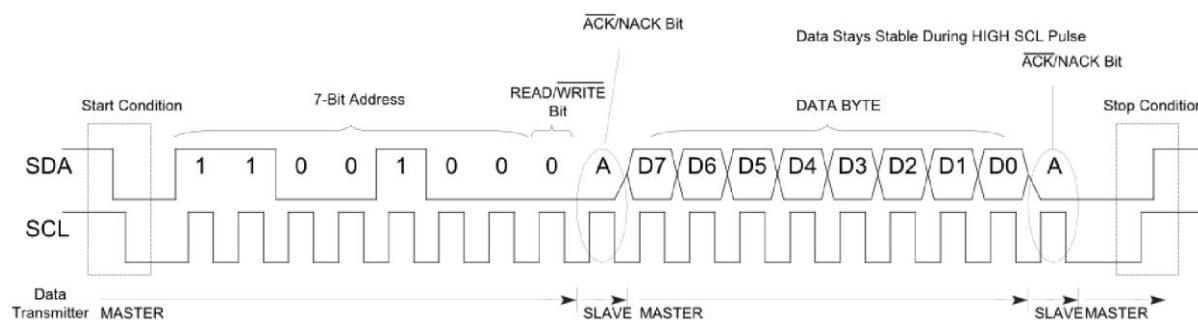


Рисунок 1.2 – Протокол I²C

Висновок до розділу

У розділі розглянуто концепції, що використовуються у приладах тепловізійного бачення, порівняно комерційні моделі тепловізорів за їх характеристиками, а саме – родільна здатність матриці, частота оновлення зображення, діапазон вимірюваних температур, похибка вимірювання теплової чутливості, наявність оптичної камери для накладання контурів об’єктів у кадрі, спосіб відображення тепловізійної мапи. Проаналізовані вдалі конструктивні рішення, які в подальшому будуть використовуватись у розробці пристрою. Виконано попередній патентний пошук. Наведено основні теоретичні відомості підходів, що будуть використовуватись у проекті.

Розділ 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

2.1 Розробка структурної схеми та принцип роботи модулю

В технічному завданні викладені основні функціональні компоненти пристрою. Функціональна структура пристрою складається з наступних блоків:

- ІЧ матриця MLX90640 [13].
- Камера
- LCD монітор
- Клавіатура

Програмована логічна матриця, всередині якої реалізовано контролер камери та фрейм буфер, І²С мастер, контролер ІЧ матриці, контролер блоку накладання та відображення. Структура тепловізійного пристрою зображена на рисунку 2.1.

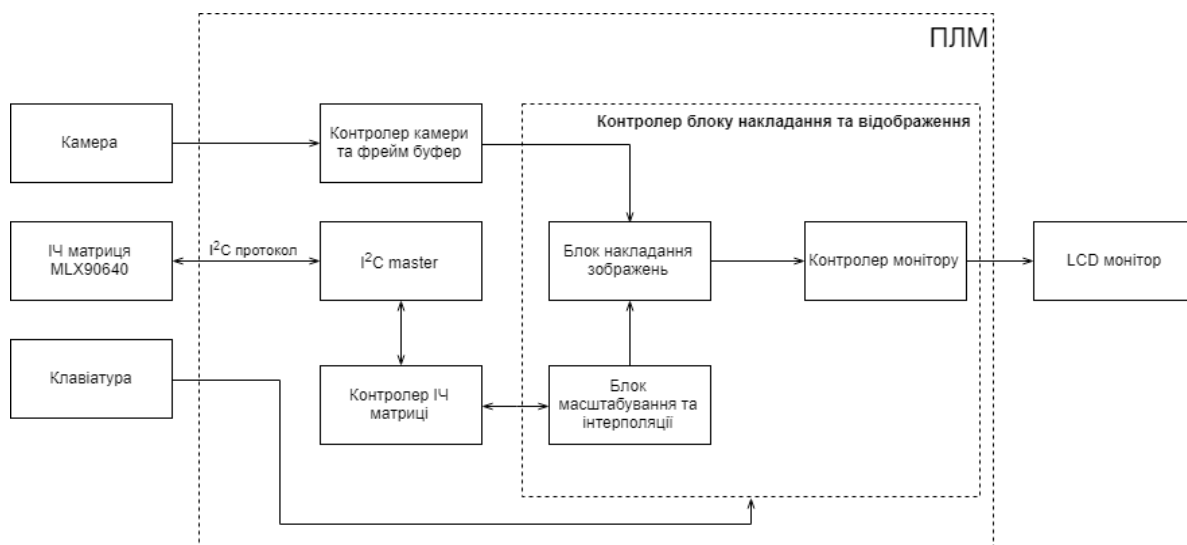


Рисунок 2.1 – Структура тепловізійного пристрою

2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази

Вибір елементної бази ґрунтується на схемі електричній принциповій та умовах, викладених в технічному завданні. Вона складається з наступних електро-радіо-елементів:

- мікросхем
- конденсаторів

- резисторів

2.2.1 Вибір мікросхеми контролеру заряду акумулятора

Пристрій є портативним, та має у своїй конструкції акумулятор, тому до складу схеми необхідно включити ланцюг заряду li-ро акумулятора. Було обрано три універсальних мікросхеми для заряду li-ро та li-ion акумуляторів: Texas Instruments BQ21040DBVR [14], Microchip MCP73812T [15] та NanJing Top Power TP4056 [16].

Таблиця 2.1 – Параметри ІС контролерів заряду акумулятору

Серія ІС	Параметри				
	Максимальний струм заряду (А)	Похибка напруги заряду (%)	Можливість підключення термістору	Діапазон робочих температур (°C)	Ціна (\$)
MCP73812T	0,5	±1	-	-40 - 80	0,46
TP4056	1	±1,5	+	-40 - 85	0,05
BQ21040	0,8	±1	+	0 - 125	1
Ваговий коеф. b_j	0,35	0,15	0,25	0,1	0,15

Вагові коефіцієнти підбрані у відповідності до важливості конкретного параметру, більш важливому параметру відповідає більший коефіцієнт. Складаємо матрицю X відповідно до таблиці основних параметрів, прибираємо проміжки і вагові коефіцієнти (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Матриця приведених параметрів

X =	0,5	1	0	120	0,46
	1	1,5	1	125	0,05
	0,8	1	1	125	1

Тепер потрібно привести матрицю приведених параметрів до матриці |N| - нормованих параметрів, користуючись формулою:

$$a_{ij} = \frac{(\max_j x_{ij} - x_{ij})}{x_{ij}}, \quad (2.1)$$

де: $\max_j x_{ij}$ – максимальне значення в стовпчику j матриці X;

x_{ij} – поточне значення в стовпчику j матриці X.

Матриця нормованих параметрів |N| наведена у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Матриця нормованих параметрів

N =	MCP73812T	0,5	0	1	0,04	0,891
	TP4056	0	0,333	0	0	0
	BQ21040DBVR	0,2	0	0	0	0,95

Введемо оціночну функцію Q_i , яка визначається формулою:

$$Q = \sum_{j=1}^n a_j b_j, \quad (2.2)$$

де: a_j – нормований параметр у стовпчику j;

b_j – ваговий коефіцієнт для стовпчика j.

Таблиця 2.4 – Значення оціночних функцій для кожної мікросхеми

Назва	Значення оціночної ф-ції
МCP73812T	0,429
TP4056	0,05
BQ21040DBVR	0,07

Визначивши Q_i для кожної мікросхеми, обираємо ту, яка найкраще задовольняє вимоги ТЗ. Найменшому значенню Q_i відповідає краща мікросхема. В цьому випадку, мікросхема TP4056 підходить найкраще.

2.2.2 Вибір мікросхеми стабілізації напруги

Було обрано три мікросхеми, які можуть забезпечити функціональні модулі пристрою стабільною напругою 3,3 В: Texas Instruments TPS63001 [17], TPS613221 [18] та Recom Power RPM3.3-1.0 [19].

Таблиця 2.5 – Параметри ІС стабілізаторів напруги

Серія ІС	Параметри			
	Діапазон вхідних напруг (В)	Максимальний вихідний струм (А)	Діапазон робочих температур (°С)	Ціна (\$)
TPS63001	1,8 - 5,5	0,8	-40 - 85	1
TPS613221	0,9 - 5,5	0,75	-40 - 85	0,92
RPM3.3-1.0	3 - 5	1	-40 - 105	4,2
Ваговий коеф. b_j	0,35	0,25	0,15	0,25

Після видалення діапазонів, нормування матриці та множення кожної характеристики на відповідний ваговий коефіцієнт, отримали значення оціночних функцій для кожної мікросхеми .

Таблиця 2.6 – Значення оціночних функцій для стабілізаторів напруги

Назва	Значення оціночної ф-ції
TPS63001	0,1213
TPS613221ADBVR	0,153
RPM3.3-1.0	0,1952

Вибір зроблено на користь TPS63001 від Texas Instruments.

2.2.3 Вибір мікросхеми для живлення підсвітки дисплею

Для підсвітки LCD дисплею потрібна напруга 9,6 В. Для цього потрібно включити до загальної схеми ланцюг підвищення напруги. Маємо вибірку з трьох мікросхем: Arosemi Technology MT3608 [20], Texas Instruments LM2621 [21] та TPS61170 [22]. Параметри наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Параметри ІС підвищуючих конвертерів напруги

Серія ІС	Параметри				
	Діапазон вхідних напруг (В)	Максимальний вихідний струм (А)	Діапазон вихідних напруг (В)	Діапазон робочих температур (°C)	Ціна (\$)
MT3608	2 – 24	2	2 – 28	-35 – 70	0,1
LM2621	1,2 – 14	1	1,24 – 14	-40 – 80	1,09
TPS61170	3 – 18	0,5	5 – 12	-40 – 85	0,95
Ваговий коеф. b_j	0,25	0,3	0,25	0,1	0,1

Результуючі значення оціночних функцій для підвищуючих стабілізаторів напруги:

Таблиця 2.8 – Значення оціночних функцій для підвищуючих конверторів напруги.

Назва	Значення оціночної ф-ції
MT3608	0,016
LM2621	0,471
TPS61170	0,470

Очевидний лідер – MT3608.

2.2.4 Вибір ПЛІС

Згідно з первинним технічним завданням, будемо використовувати лінійку ПЛІС Intel MAX 10 [23]. Було відібрано три серії: 10M16, 10M25, 10M40. Зрозуміло, що більш продуктивніша серія ПЛІС буде краща за всіма показниками за попередню, тому було вирішено обрати серію 10M25 як найоптимальнішу за відношенням ціна-функціональність. У процесі оптимізації дизайну, та реалізації усього функціоналу буде виявлено, чи достатньо нам потужностей цієї мікросхеми та чи можна вмістити дизайн у менш продуктивну та більш доступну у ціні ПЛІС.

Таблиця 2.9 – Параметри програмованих матриць серії 10M Intel

Серія IC	Параметри				
	Кількість логічних комірок	Об'єм Flash пам'яті (Kb)	Кількість М9К блоків внутрішньої статичної пам'яті	Кількість логічних блоків	Ціна (\$)
10M16	16000	2368	549	1000	40
10M25	25000	3200	675	1563	48,6
10M40	40000	5888	1260	2500	75,6

Особливістю ПЛІС серії Intel MAX 10 є те, що вони містять внутрішню флеш-пам'ять та внутрішній генератор синхросигналу, з частотою до 116 МГц. Це зроблено для того, щоб економити місце на друкованій платі. Будемо використовувати внутрішній генератор для глобального клакового дерева. Кожна серія ПЛІС з представлених у таблиці 2.9 має 4 внутрішні PLL. Кожен блок PLL має вихід C0, який може використовуватися для формування зовнішнього синхросигналу, як у диференційному режимі, так і одиночному (single-ended) (рисунок 2.2).

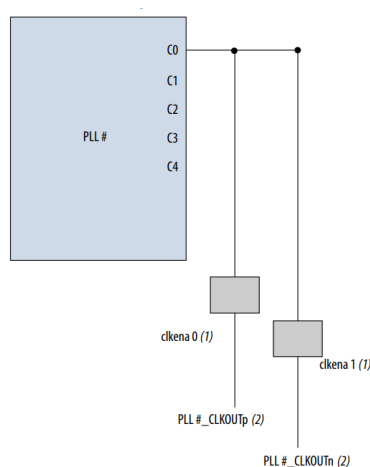


Рисунок 2.2 – Вихід C0 блоку PLL

Будемо використовувати цю функцію для формування синхроімпульсів для камери та LCD дисплею.

2.3 Розробка та розрахунок схеми електричної принципової

У дипломному проекті під назвою «Тепловізійний пристрій», розглядається розробка друкованого вузла, який є контролером тепловізора, схема електрична принципова якого наведена на кресленні ДК52.201152.001Е3.

2.3.1 Ланцюг заряду акумулятора

Схема контролера тепловізора живиться від Li-ро акумулятору, що підключається до роз'єму XS5. 5В постійної напруги живлення для заряду акумулятору поступає з роз'єму micro USB female XS4.

Використовувана у проекті ПЛІС Intel FPGA 10M25SAE144C8G серії MAX10 живиться напругою 3,3 В. Напруга на одній Li-ро батареї, в залежності від рівня її заряду, може коливатися від 3 В (повністю розряджена, спрацьовує захист від перерозряду контролером всередині батареї, що відсікає навантаження), до 4.2 В (повністю заряджена) [24]. Для правильного заряду таких батарей використовуються контролери заряду. У схемі було використано TP4056 від NanJing Top Power для заряду li-ion, li-ро батарей, максимальний струм заряду задається резистором R_{prog} (R_3 у схемі), і це значення може бути у діапазоні від 0,45 А до 1 А. Було обрано струм 1 А, так як планується використання акумулятору, ємність якого рівна, або перевищує 2 А * год, а загальне правило для заряду li-ро, li-іон виглядає так [25]:

$$\max I_{\text{заряду}} = \frac{1}{2} C, \quad (2.1)$$

де: С – ємність акумулятору.

Схема заряду акумулятору зображена на рисунку 2.3.

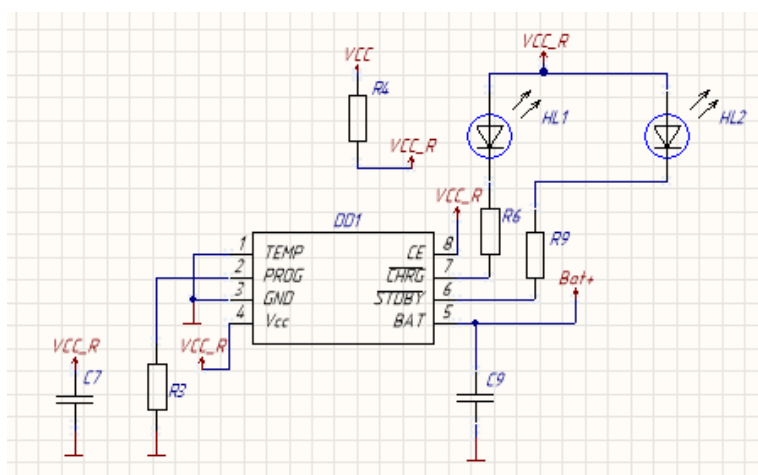


Рисунок 2.3 – Схема заряду акумулятора

2.3.2 Ланцюг стабілізації

Для стабілізації напруги з акумулятору, та отримання стабільної напруги 3,3 В використовується мікросхема TPS63001. Її підключення обрано згідно рекомендаціям технічної документації на дану мікросхему [17]. На вході

живлення мікросхеми ставляться керамічні конденсатори номіналом 10 мкФ та 0,1 мкФ. Таке рішення прийнято з досвіду та зважаючи на технічну документацію. Такі конденсатори називаються блокуючими та використовуються для мінімізації сплесків напруги живлення. Схема стабілізації напруги 3,3 В зображена на рисунку 2.4.

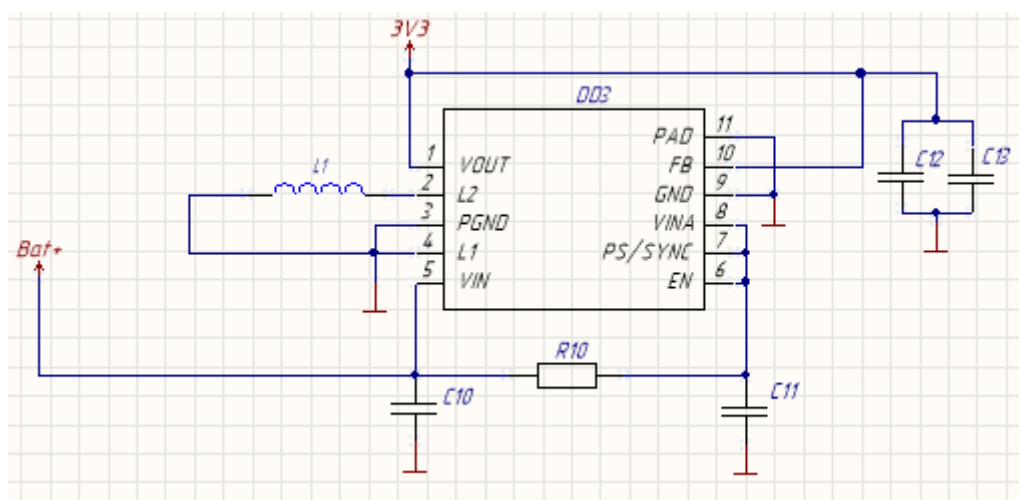


Рисунок 2.4 – Схема стабілізації напруги з акумулятору

2.3.3 Ланцюг живлення LCD дисплею

Для живлення підсвітки LCD дисплею потрібна напруга 9.6 В. Було прийнято рішення використати step-up конвертор MT3608. Підключення здійснено по схемі з технічної документації на мікросхему [20]. Вихідна напруга задається резисторами R_{11} та R_{12} за формулою 2.2:

$$U_{out} = U_{ref} * \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{12}}\right), \quad (2.2)$$

де: $U_{ref} = 0,6$ В. Для задання вихідної напруги 9,6 В було обрано резистори $R_{11} = 33$ кОм, та $R_{12} = 2,2$ кОм. В результаті отримали вихідну напругу:

$$U_{out} = 0,6 * \left(1 + \frac{33000}{2200}\right) = 9,6 \text{ (В)}$$

Також було обрано котушку індуктивності номіналом 22 мкГн, що рекомендовано технічною документацією. З тих самих причин на вхід та вихід конвертору встановлено керамічні конденсатори 22 мкФ з діелектриком типу X5R [26]. Вхід EN підключено до виходу IO_61 FPGA щоб мати змогу вмикати та вимикати підсвітку. Схема живлення підсвітки LCD дисплею зображена на рисунку 2.5.

Основною складовою схеми є FPGA 10M25SAE144C8G фірми Intel. Вона має 144 контакти. Для пристрою, що розробляється, такої кількості достатньо. Дуже зручним є той факт, що ядро ПЛІС, усі банки вводів/виводів та навіть блок АЦП живляться від напруги 3,3 В. На контакти живлення ставляться шість конденсаторів 0,1 мкФ, та один на 1 мкФ.

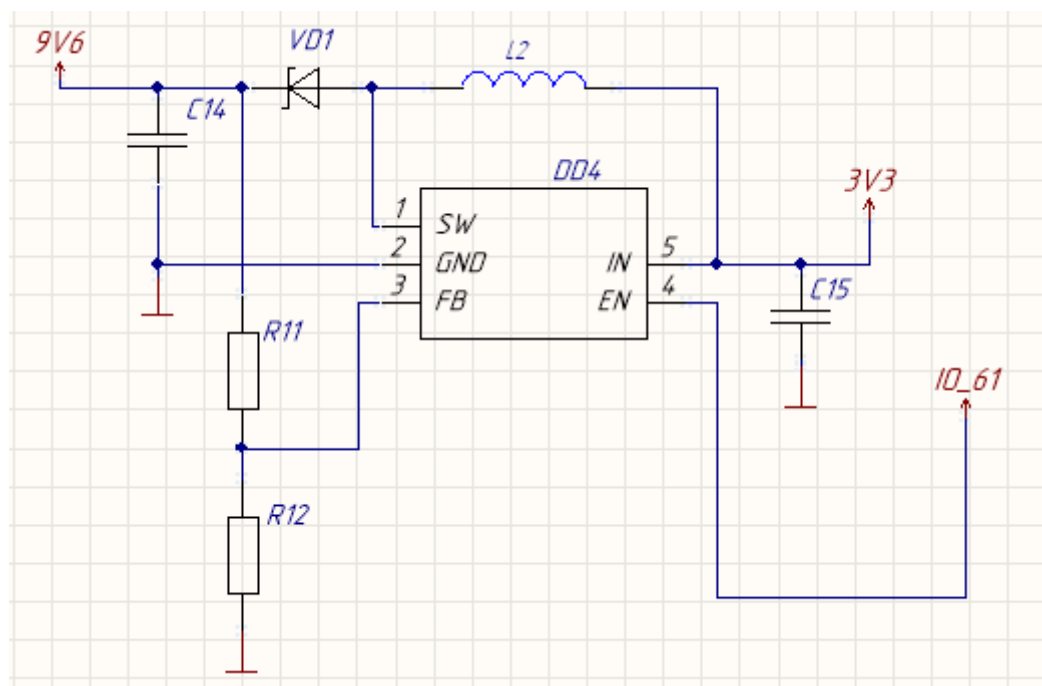


Рисунок 2.5 – Схема живлення підсвітки LCD дисплею

Коли конденсатор ставиться біля контакту живлення будь-якої мікросхеми, то шлях провідника між контактом мікросхеми та конденсатором має свою паразитну індуктивність та опір, може створитись фільтр, який при високих частотах негативно впливає на роботу мікросхеми. В деяких випадках запобіжні конденсатори необхідно ставити на сам контакт мікросхеми. Це рекомендовано

самими виробниками. У випадку з FPGA, Intel має рекомендаційні поради для правильного розташування компонентів на платі. Але для даного пристрою такі вимоги не критичні, тому конденсатори розташовано лише близько до контактів FPGA.

2.3.4 Підтягуючі резистори на шині I²C

Підтягуючий резистор – резистор, що включений між провідником, по якому поширюється електричний сигнал, і живленням, або між провідником і землею. Підтягуючий резистор потрібен для того, щоб гарантувати на логічному вході, з яким сполучений провідник, високий (у випадку підтягування до живлення) або низький (у випадку підтягування до землі) рівень сигналу, якщо:

- провідник не з'єднаний з логічним виходом;
- приєднаний логічний вихід знаходиться в високоімпедансному стані.
- коли розімкнутий ключовий елемент на приєднаному логічному виході, який влаштований, як відкритий вихід ключового елементу. Ключовим елементом може бути польовий або біполярний транзистор, а відкритим виходом — колектор, емітер, стік або витік [27].

Максимальний опір підтягуючого до живлення резистору обмежений ємністю шини I²C. Ємність збільшує час переходу з низького рівня у високий сигнал SDA чи SCL. Якщо значення резистора занадто високе, лінія I²C може не встигати змінювати логічні рівні, через малий струм.

Вибір значення опору ґрунтувався на рекомендаціях виробників мікросхем [28], у яких реалізована передача даних за протоколом I²C, та зважаючи на власний досвід. Обране значення – 4,7 кОм.

2.3.5 Ланцюг оцінки рівня заряду акумулятора

Для реалізації функції оцінки рівня заряду акумулятора будемо використовувати блок АЦП всередині ПЛІС. Підключення лінії «Bat+» напряду

до акумулятору не є можливим, оскільки опорна напруга блоку АЦП – 3,3 В, а діапазон напруг на акумуляторі, в залежності від рівня його заряду 3 – 4,2 В.

Тому використаємо подільник напруги на резисторах з похибкою номіналу 1%.

R_7 та R_8 . Напруга на вході АЦП буде рівною:

$$U_{adc} = \frac{U_{bat} \cdot R_8}{(R_7 + R_8)}, \quad (2.3)$$

де: U_{bat} – напруга на акумуляторі, максимальне значення якої 4,2 В;

U_{adc} – напруга на вході АЦП, значення якої не має перевищувати 3,3 В;

R_7, R_8 – опори резисторів R_7 і R_8 , відповідно.

Прийmemo значення резистору R_7 рівним 1 кОм. Тоді, маючи пропорцію відношення напруг до відношення опорів, та приймаючи, що на резисторі R_7 має падати напруга ($U_{bat} - U_{adc}$), маємо:

$$\frac{(U_{bat} - U_{adc})}{U_{adc}} = \frac{R_7}{R_8}, \quad (2.4)$$

перетворивши формулу 2.4, щоб знайти опір R_8 :

$$R_8 = \frac{R_7 \cdot U_{adc}}{(U_{bat} - U_{adc})} = \frac{3300}{0,9} = 3,666 \text{ (кОм)}$$

Найближчий номінал – 3,6 кОм, тому, знайдемо значення максимальної напруги на вході АЦП, при повністю зарядженому акумуляторі, та при $R_8 = 3,6$ кОм за 2.3:

$$U_{adc} = \frac{4,2 \cdot 3600}{1000 + 3600} \approx 3,287 \text{ (В)}$$

Подільник напруги в активному режимі роботи пристрою постійно споживає струм, що не є оптимальним. Тому було прийнято рішення встановити

польовий транзистор, з низькою напругою відкриття каналу $U_{threshold} \approx 2$ В, щоб увімкнути подільник напруги, коли потрібно виконати вимірювання заряду.

Обраний транзистор – n-канальний PMF370XN компанії NXP, напруга відкриття якого – 1,8 В [29], максимальний струм витоку – 0,55 А, при 100°C, чого більш ніж достатньо. Між землею та затвором транзистору підключено резистор R5 номіналом 10 кОм, щоб розряджати ємність затвору-витоку, для правильного закриття транзистору.

Розрахуємо, скільки струму може економити таке рішення.

$$I_{leak} = \frac{U_{bat_{max}}}{(R_7 + R_8)}, \quad (2.5)$$

де: I_{leak} – струм, що споживає подільник напруги;

$U_{bat_{max}}$ – максимальна напруга на акумуляторі (4,2 В);

R_7, R_8 – опори резисторів R7 і R8, відповідно.

Підставимо значення у (2.5):

$$I_{leak} = \frac{4,2}{(1000 + 3600)} \approx 0,913 \text{ (мА)}$$

Заряд акумулятору буде розраховано, використовуючи криву залежності рівню заряду акумулятору від напруги на ньому, за потреби досягти більшої точності оцінки, можна використати більш прецизійні резистори, врахувати опір відкритого каналу польового транзистору VT1, вхідний опір АЦП.

2.3.6 Підключення камери

Згідно з вимогами ТЗ (додаток А), у блоку контролера має передбачатися підключення камери OV7670 Omni Vision [30], з оптичним сенсором, роздільною здатністю 640 на 480 пікселів. Підключення відбувається за допомогою провідників для паралельної 8-бітної шини даних, та синхросигналів. На рисунку 2.6 наведено блок-діаграму функціональних блоків камери.

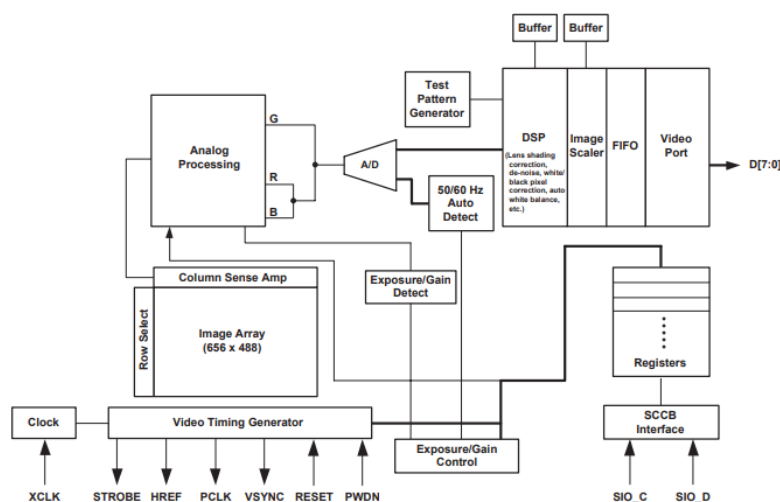


Рисунок 2.6 – Блок-діаграма функціональних блоків камери

Роз'єм XS2 слугуватиме для підключення камери.

2.3.7 Підключення дисплею

Згідно з вимогами ТЗ (додаток А), у блоку контролера має передбачатися підключення LCD дисплею MOP-TFT320240-35A [31] компанії Matrix Orbital, роздільної здатності 320 на 240 пікселів. Вивід даних на дисплей відбувається по паралельній шині 8 або 24 біт(по одному байту на колір) або по послідовній шині I²C. Будемо використовувати паралельне підключення, та в режимі паралельних 24 біт, оскільки виводів ПЛІС більш ніж достатньо, та це знизить частоту синхросигналу DCLK у три рази (з 19,5 до 6,5 МГц), оскільки інформація про колір кожного пікселю буде передаватись за один раз.

Варто зазначити, що світлодіоди підсвідки дисплею підключені послідовно-паралельно (2 паралельних ланцюги по 3 послідовно ввімкнених світлодіодів), тому типова напруга живлення складає 9,6 В, згідно технічної документації. Тому у розділі 2.3.3 було проведено розрахунок режиму для параметричного підвищуючого стабілізатору напруги. Роз'єм XS6 слугуватиме для підключення дисплею.

Висновок до розділу

У розділі було виконано підбір мікросхеми контролеру заряду акумулятора, стабілізатору напруги з акумулятору, підвищуючого конвертора напруги для живлення підсвітки дисплею. Також була відібрана ПЛІС із серії, що вимагалась умовами технічного завдання.

Також були розглянуті схемотехнічні рішення, що були реалізовані у блоці керування тепловізором, та розраховані значення резисторів для встановлення режиму роботи підвищуючого конвертору, резистору для визначення максимального струму заряду акумулятора. Обґрунтовано встановлення конденсаторів біля виводів живлення мікросхем. Дано пояснення про резистори підтяжки до напруги живлення для послідовної шини І²С. Наведено відомості про підключення дисплею та камери, які є вимогою ТЗ.

					<i>ДК52.201152.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Розділ 3 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

3.1 Вибір типу та матеріалу друкованої плати.

Друкована плата — пластина, яка виконується з діелектрика (найчастіше використовують склотекстоліт, текстоліт, гетинакс, ситал, тощо) на поверхні якої сформований шар (хоча б один) з провідними доріжками (також шар може бути розташований всередині пластини). На такі плати монтують електронні компоненти, які мають бути з'єднані між собою за допомогою провідних доріжок. Вся система тоді утворює певну схему, яку можна назвати змонтованою друкованою платою [32].

Є різні класи друкованих плат:

- односторонні (одношарові) - ОДП,
- двосторонні (двошарові) – ДДП,
- багатошарові - БДП.

Односторонні плати використовуються для монтажу елементів з одної сторони. Для створення односторонніх друкованих плат використовують шаруватий пресований або рельєфний литий текстоліт, де розташовують без металізації або з металізацією монтажні отвори. Такі плати прості по конструкції й дешеві у виготовленні. При неможливості стовідсоткового використання друкованих провідників застосовуються навісні перемички [32].

Існує два різновиди двосторонніх друкованих плат: наскрізні отвори з металізацією або без. У ДДП елементи розміщуються з двох сторін плати, а тому цей вид плати повинен проводити струм з обох сторін, саме цей клас потребує високу щільність установки компонентів і формування трасування. Для поєднання обох шарів плати використовують металізовані перехідні отвори. Тут використовують як поверхневий монтаж компонентів (з двох сторін), так і монтаж компонентів з штировими або осьовими висновками. ДДП – найпоширеніший клас ДП [32].

Багатошарові друковані плати (БДП) складаються з шарів які чергуються між собою. Це шари ізоляційного матеріалу та шари на яких нанесений провідний матеріал (металізація). Шари поєднуються між собою клейовими прокладками, які створюються за шляхом пресування. Для поєднання металізовани шарів використовуються спеціальні об'ємні деталі, друковані елементи або хіміко-гальванічну металізацію. БДП характеризується кращою надійністю, стійкістю до зовнішніх впливів ніж ОДП та ДДП. Також розміри плат БДП менше ніж ОДП та ДДП. Але такі плати складніше виготовляти, вони потребують високої точності нанесення малюнків, існує необхідність ретельного контролю на всіх операціях, низька ремонтпридатність та висока вартість виготовлення [32].

Згідно схеми електричної принципової було прийнято рішення виготовляти пристрій на основі 4-шарової друкованої плати. Це рішення було прийнято, оскільки:

- У схемі більшість елементів поверхневого монтажу. Для спрощення трасування та зменшення площі використаємо БДП.
- В нашій системі важливо максимально зменшити паразитні властивості ДП, оскільки це буде впливати на систему датчиків, а тому вигідно використовувати БДП
- Більша частина елементів знаходиться на верхньому шарі плати. Також є шар-полігон напруги живлення, земляний шар-полігон, який буде служити екраном для інших шарів.

Для виробництва даної ДП використовуються імпортні матеріали, які забезпечують високу надійність. Саме тому при виборі матеріалу звертається увага на такі критерії:

- високі електроізоляційні властивості;
- достатня стійкість до механічних впливів;
- стійкість до кліматичних умов.

Для даного пристрою нас задовольняє склотекстоліт FR4.

Параметри склотекстоліту FR4:

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- максимальна робоча температура 140 °С;
- поверхневий опір 10^6 МОм;
- пробивна напруга 55 кВ;
- тангенс кута діелектричних втрат 0,021;
- міцність на прогин 550 МПа;
- гігроскопічність 0,2%;
- поздовжнє і поперечне викривлення не більше 0,18%;
- стійкість до розплавлення припою не менше 80 секунд;

Ми обираємо склотекстоліт FR4 для нашого приладу. Оскільки це один із найпопулярніших матеріалів для виготовлення друкованих плат та має один з найкращих показників діелектричної сталості. Ми також могли обрати FR5, але цей матеріал дорожче та використовується на більш високих температурах.

Виготовляти ДП будемо комбінованим позитивним методом, оскільки цей спосіб є надійним і відносно дешевим порівняно з хімічним та адитивним.

Товщина нашої плати - 1,5 мм. Цього буде достатньо для нашого приладу, оскільки нам не потрібна велика вібростійкість. Обираємо товщину мідної фольги. Є декілька варіантів які нам можуть підійти:

- 12 мкм
- 18 мкм
- 35 мкм

(всі наступні нам не підходять, оскільки буде вплив на роботу приладу). Ми обираємо 35 мкм, оскільки цей варіант підходить по товщині, і не матиме значного негативного впливу на наш прилад. Тобто наш кінцевий результат – FR-4-35-1.5.

3.2 Вибір класу точності друкованої плати

Існує п'ять класів точності ДП (ГОСТ 23571-86). Вибір класу точності пов'язаний з виробництвом певного пристрою. Кожен клас точності має власні значення для таких параметрів:

- Ширина друкованого провідника

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

- Відстань між елементами
- Гарантований поясок
- Відношення номінального діаметру найменшого з металізованих отворів до товщини плати

Всі ці дані приведені у таблиці 3.1. У таблиці 3.2 приведені похибки виконання елементів ПМ.

Таблиця 3.1. Граничні значення основних параметрів ДМ

Параметер	Позначення	Клас точності			
		2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	$b_{прг}$	0,45	0,25	0,15	0,10
Відстань між елементами друкованого монтажу, мм	l_r	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантований поясок, мм	$b_{по}$	0,20	0,10	0,05	0,03
Відношення номінального діаметру найменшого з металізованих отворів до товщини друкованої плати, мм	$K_{дт}$	0,40	0,33	0,25	0,20

Таблиця 3.2. Допустимі похибки виконання елементів ПМ

Похибка	Позначення	Максимальне значення, мм
Зміщення провідників відносно ліній КО	$\delta_{сп}$	0,05
Розташування отворів (всіх) відносно вузлу КО	δ_o	0,07
Розташування КМ відносно вузлу КО	$\delta_{км}$	0.015(0.05)
Фотокопії та фотошаблону	$\delta_{фф}$	0,06

Друковані плати 3-го класу - найбільш поширені в виробництві, оскільки, з одного боку, забезпечують досить високу щільність трасування і монтажу, а з іншого - для їх виробництва потрібно рядове, хоча і спеціалізоване, обладнання [33].

Друковані плати 4-го класу випускаються на високоточному обладнанні, але вимоги до матеріалів, обладнання та приміщень нижче, ніж для п'ятого класу. Виготовлення друкованих плат 5-го класу вимагає застосування унікального високоточного обладнання, спеціальних (як правило, дорогих) матеріалів,

безусадочної фотоплівки і навіть створення у виробничих приміщеннях «чистої зони» з термостатуванням. Таким вимогам відповідає далеко не кожне виробництво. Але друкована плат невеликого розміру може виконуватися по п'ятому класу на обладнанні, яке забезпечує одержання плат четвертого класу. Комплексно вирішити всі ці проблеми вдається тільки на реальному виробництві [33].

Випуск друкованих плат 2-го класу здійснюється на рядовому обладнанні, а іноді навіть на обладнанні, не призначеному для виготовлення друкованих плат. Такі ДП з невисокими (і навіть з низькими) конструктивними параметрами призначені для недорогих пристроїв з малою щільністю монтажу. До цього класу належать друковані плати любительського і макетного рівня, часто одиничного або дрібносерійного виробництва [33].

В результаті аналізу поставленої задачі та різних класів точності, було обрано 5-ий клас. Основним аргументом є те, що маємо велику кількість контактів FPGA і відносно невеликі розміри плати, так як пристрій має бути портативним.

3.3 Вибір методу виготовлення друкованої плати

Комбінований позитивний метод представляє собою виготовлення ДП на фольгованому діелектрику з металізацією отворів, при якому спочатку виконується свердління отворів і металізація, а потім травлення міді з пробільних місць.

При нанесенні рисунку схеми пробільні місця покриваються захисним шаром. Після свердління і хімічного міднення отворів здійснюється гальванічне осадження міді на провідники, контактні площадки та в отвори, потім наноситься шар металу (срібло, сплав олово-свинець, сплав Розе і т.п.), після чого видаляється захисний шар із пробільних місць і стравлюється фольга.

Метод дозволяє виготовляти ДП із підвищеною щільністю монтажу, високими електричними параметрами і високою міцністю зчеплення провідників.

Рекомендується для виготовлення ДП для апаратури, що працює в жорстких умовах експлуатації. Метод є кращим для нових розробок.

Для отримання захисного рельєфу використовується сухий плівковий фоторезист (СПФ) товщиною 15 ... 50 мкм.

3.4 Розміщення компонентів та трасування ДП

При розміщенні компонентів друкованої плати, було надано пріоритет сильнозв'язним елементам. Це пари DD2-XS2 та DD2-XS6. Ці елементи були розміщені у першу чергу, щоб знизити довжини провідників, особливу увагу приділено провідникам синхросигналів для роз'ємів камери та LCD дисплею. Для трасування використовувалась САПР Altium Designer із налаштуваннями правил для обраного 5-го класу точності, за виключенням ширини провідників – 0,15мм.

Далі проводилось трасування зі застосуванням інтерактивного (ручного) режиму та режиму “active route” – трасування конкретного елемента чи провідника.

Висновок до розділу

У розділі було обрано тип та матеріал друкованої плати – чотиришарова плата, матеріал – FR4. Метод виготовлення – комбінований позитивний, оскільки цей спосіб є надійним і відносно дешевим порівняно з хімічним та адитивним.

Виконано огляд існуючих класів точності друкованих плат за ГОСТ 23571-86, та обрано клас точності, за яким буде проектуватись друкований вузол. Рішення прийнято на користь п'ятого класу точності, з шириною провідників 0,15 мм. Такий вибір мотивовано потребою мінімізувати зазори між контактними майданчиками та провідниками, так як маємо велику кількість виводів ПЛІС (144 контакти).

При проектуванні друкованої плати було виділено сильнозв'язані елементи – пари DD2-XS2 та DD2-XS6. Посадкові місця цих елементів були додані до друкованого вузлу та розміщені у першу чергу. Трасування провідників

вищезгаданих пар елементів теж виконувалось насамперед, щоб мінімізувати довжини провідників. Особливу увагу приділено провідникам синхросигналів для камери та LCD дисплею.

Проектування друкованого вузлу виконувалось за допомогою системи автоматизованого проектування Altium Designer. Згідно з обраним класом точності були створені правила трасування (design rule check). Трасування виконувалось із застосуванням інтерактивного (ручного) режиму та режиму “active route” – автоматичне трасування конкретного елемента чи провідника.

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Розділ 4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАВИЛЬНІСТЬ КОНСТРУКТОРСЬКОГО РІШЕННЯ

4.1 Виконання конструкторсько-технологічного розрахунку елементів друкованого монтажу

Усі розрахунки в даному розділі виконуються за [34]. Усі геометричні параметри провідників та КМ узяті з проекту друкованої плати у САПР Altium Designer.

4.1.1 Визначення мінімальної ширини друкованого провідника по постійному струмі для ланцюгів живлення та землі

Розрахуємо мінімальну ширину друкованого провідника ланцюгів живлення і землі за формулою:

$$b_{minI} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{пров}}, \quad (4.1)$$

де: I_{max} – максимально можливий струм у ланцюгу;

$j_{доп}$ – допустима щільність струму друкованого провідника, що виготовлений комбінованим позитивним методом, $j_{доп}=48 \text{ А/мм}^2$ (за ОСТ 4.010.022–85);

$t_{пров}$ – товщина друкованого провідника, що визначається виразом:

$$t_{пров} = h_{\phi} + h_{ГМ} + h_{ХМ}, \quad (4.2)$$

де: h_{ϕ} – товщина фольги матеріалу $h_{\phi}=0,035 \text{ мм}$;

$h_{ГМ}$ – товщина гальванічно осадженої міді $h_{ГМ}=0,055 \text{ мм}$;

$h_{ХМ}$ – товщина шару хімічно осадженої міді $h_{ХМ}=0,0065 \text{ мм}$.

В нашому випадку, за (4.2):

$$t_{пров} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,0965 \text{ (мм)}$$

Пристрій має два режими роботи: активний режим та режим заряду. З цього випливає, що ми матимемо два ланцюги живлення: для заряду акумулятору, та живлення пристрою в активному режимі. У таблиці 4.1 наведено перелік елементів пристрою, що працюють в активному режимі та їхні струми.

Таблиця 4.1 – Елементи пристрою, що працюють в активному режимі, та їхні струми

IC	Кількість IC	Максимальний $I_{\text{спож}}$, мА
10M25SAE144C8G	1	250
MT3608	1	2,2
MOP-TFT320240	1	20+50
OV7670	1	18
MLX90640	1	23
TPS63001	1	0,05

Сума струмів елементів пристрою, що працюють в активному режимі:

$$I_{\text{maxact}} = 363,25 \text{ (мА)}$$

Максимальний струм буде у ланцюгу заряду акумулятору. Визначимо $I_{\text{maxcharge}}$, як суму струмів:

$$I_{\text{maxcharge}} = I_{\text{ccmax}} + I_{\text{bat}}, \quad (4.3)$$

де: I_{ccmax} – струм, що споживає мікросхема (максимальне значення);

I_{bat} – максимальний струм заряду li-ро батареї.

У результаті:

$$I_{\text{maxcharge}} = 0,5 + 1000 = 1,0005 \text{ (А)}$$

Отже, мінімальна ширина друкованого провідника на постійному струмі для ланцюгів заряду акумулятора (Розраховано за формулою 4.1):

$$b_{minI} = \frac{I_{maxcharge}}{j_{доп} * t_{пров}} = \frac{1,0005}{48 * 0,0965} = 0,108 \text{ (мм)}.$$

Така ширина провідника має бути у ланцюгу заряду акумулятору, у ланцюгу живлення в активному режимі маємо струм споживання значно менший (363,25 мА), проте було вирішено встановити у САПР Altium Designer мінімальну ширину 0,15 мм для усіх провідників.

4.1.2 Визначення мінімальної ширини провідника з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги

Мінімальна ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому визначається наступним виразом:

$$b_{minU} = \frac{\rho * I_{max} * L_{пров}}{t_{пров} * U_{доп}}, \quad (4.4)$$

де: ρ - питомий опір провідника, виготовленого комбінованим позитивним методом, $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

$L_{пров}$ – довжина найдовшого друкованого провідника на друкованій платі

$U_{доп}$ – допустиме падіння напруги на друкованому провіднику $U_{доп} = 0,05 \cdot U_{жив}$

Отже, для частини схеми заряду акумулятору, що працює від джерела живлення 5,5 В:

$L_{пров} = 0,081 \text{ м}$ (провідник *Bat +*)

$U_{доп} = 5 * 0,05 = 0,250 \text{ (В)}$,

за формулою 4.4:

$$b_{minU} = \frac{\rho * I_{max_{act}} * L_{пров}}{t_{пров} * U_{доп}} = \frac{0,0175 * 1,0005 * 0,081}{0,0965 * 0,25} = 0,058 \text{ (мм)}.$$

Тепер розрахуємо мінімальну ширину провідника для частини елементів пристрою, які працюють в активному режимі від акумулятору:

- $L_{пров} = 0,142 \text{ м (провідник 3V3);}$
- $U_{доп} = 3,3 * 0,05 = 0,165 \text{ (В)},$

за формулою 4.4:

$$b_{minU} = \frac{\rho * I_{max_{act}} * L_{пров}}{t_{пров} * U_{доп}} = \frac{0,0175 * 0,364 * 0,142}{0,0965 * 0,165} = 0,056 \text{ (мм)}.$$

Як бачимо, обраної ширини провідника 0,15 мм цілком вистачить.

4.1.3 Визначення мінімальної та максимальної ширини провідника

$$b_{min} = b_{пр}^r + 1,5 * h_{\phi} + 0,03, \quad (4.5)$$

де: $b_{пр}^r$ – мінімальна ширина провідника, в нашому випадку, $b_{пр}^r = 0,15 \text{ мм}.$

Отже, за формулою 4.5:

$$b_{min} = b_{пр}^r + 1,5 * h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 * 0,035 + 0,03 = 0,2325 \text{ (мм)}.$$

Тоді **максимальна ширина** провідника:

$$b_{max} = b_{min} + 0,02 = 0,2325 + 0,02 = 0,2525 \text{ (мм)}.$$

4.1.4 Визначення мінімальної відстані між краями двох сусідніх провідників

$$l_{ПП min} = L_0 - (b_{max} + 2\delta_{сп}), \quad (4.6)$$

де: L_0 – відстань між центрами друкованих провідників, які кратні кроку КС, $L_0 = 1 \text{ мм (найгірший випадок) ;}$

b_{max} – максимальна товщина провідника;

$\delta_{сп}$ – похибка, яка враховує зміщення провідника, $\delta_{сп} = 0,05$ мм.

За формулою 4.6:

$$l_{пп min} = 1 - (0,2525 + 2 \cdot 0,05) = 1,14 \text{ (мм)}.$$

4.2 Температурний розрахунок елемента із найбільшою потужністю

Температурний розрахунок потрібен для того, щоб зрозуміти, чи існує необхідність у монтажі додаткових систем охолодження. У нашому випадку, в активному режимі найбільшу потужність має стабілізатор TPS63001 від Texas Instruments, так як він живить переважну більшість систем у пристрої. У даташиті на цю мікросхему можемо знайти криві, що зображують залежність ККД від вихідного струму та вхідної напруги (рисунок 4.1) [17].

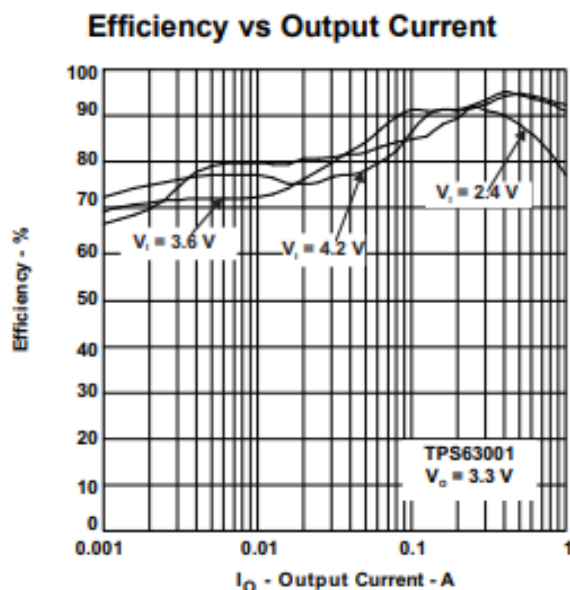


Рисунок 4.1 – Функції ККД від вихідного струму для різних вхідних напруг

З таблиці 4.1 знаходимо вихідний струм (сума струмів споживання усіх елементів, за виключенням струму споживання самої мікросхеми TPS63001):

$$I_{max} = 363,2 \text{ (мА)}$$

З рисунку 4.1 маємо, що найгірший показник ККД буде, коли мікросхема працюватиме у boost режимі (підвищення напруги) [35]. Нас цікавить крива " $V_i = 2.4 V$ ", варто зазначити, що така напруга (2.4 В) теоретично неможлива на нашій батареї (при напрузі 3 В і нижче спрацює відсікання внутрішнім контролером батареї), при нашому струмі споживання елементів, маємо ККД рівним 88%, тобто візьмемо запас 2-3 відсотки. З формули ККД:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{повна}}} \cdot 100\%, \quad (4.7)$$

де: $P_{\text{кор}}$ – споживча потужність елементів схеми, що знаходяться у ланцюгу після стабілізатору, розрахуємо її як $I_{\text{max}} * U_{\text{out}}$;

$P_{\text{повна}}$ – повна потужність (споживана та потужність, що розсіюється у вигляді тепла на корпусі мікросхеми TPS63001).

Перетворимо формулу (4.2), щоб знайти потужність, що виділяється:

$$P = \frac{I_{\text{max}} * U_{\text{out}}}{\eta} - I_{\text{max}} * U_{\text{out}} = \frac{0,364 * 3,3}{0,88} - 0,364 * 3,3 = 0,1638 \text{ (Вт)}$$

У даташиті виробником було попередньо розраховано максимальну потужність, яку може розсіяти корпус при максимальному значенні температурного діапазону, що для даної мікросхеми є рівним 85°C. На рисунку 4.2 відображені ці розрахунки.

$$P_{D(\text{MAX})} = \frac{T_{J(\text{MAX})} - T_A}{R_{\theta JA}} = \frac{125^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}}{48.7^{\circ}\text{C/W}} = 820 \text{ mW}$$

Рисунок 4.2. Розрахунки максимальної розсіюваної потужності з даташиту.

Як бачимо, корпус може розсіяти навіть у найгіршому випадку 0,82 Вт, тому додаткове охолодження мікросхеми не потрібно.

4.3 Електричний розрахунок друкованої плати

Усі розрахунки в даному розділі виконуються за [34].

4.3.1 Визначення найбільшої ємності між двома сусідніми провідниками, що розташовані на одному шарі.

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right)^{-1}, \quad (4.8)$$

де: $S = 0,125$ мм – відстань двома обраними провідниками;

$b_{\text{пр}} = 0,15$ мм – ширина друкованого провідника;

$t_{\text{пр}} = 0,035$ мм – товщина друкованих провідників;

$l_{\text{пр}} = 14,7$ мм – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників;

ε – діелектрична проникність друкованої плати із урахуванням лаку.

ε для даного розрахунку:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\text{лаку}} * \varepsilon_{\text{мат.ДП}} * (h_{\text{мат.ДП}} + 2 * h_{\text{шар лаку}})}{2 * \varepsilon_{\text{мат.ДП}} * h_{\text{шар лаку}} + \varepsilon_{\text{лаку}} * h_{\text{мат.ДП}}}, \quad (4.9)$$

де: $\varepsilon_{\text{лаку}} = 4,5$ – діелектрична проникність лаку УР-231;

$h_{\text{мат.ДП}} = 1,5 * 10^{-3}$ м – товщина друкованої плати;

$\varepsilon_{\text{мат.ДП}} = 4,5$ – діелектрична проникність FR4;

$h_{\text{шар лаку}} = 10 * 10^{-6}$ м – товщина шару лаку;

Таким чином,

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\varepsilon_{\text{лаку}} * \varepsilon_{\text{мат.ДП}} * (h_{\text{мат.ДП}} + 2 * h_{\text{шар лаку}})}{2 * \varepsilon_{\text{мат.ДП}} * h_{\text{шар лаку}} + \varepsilon_{\text{лаку}} * h_{\text{мат.ДП}}} = \\ &= \frac{4,5 * 4,5 * (1,5 * 10^{-3} + 2 * 10 * 10^{-6})}{2 * 4,5 * 10 * 10^{-6} + 4,5 * 1,5 * 10^{-3}} = 4,5 \end{aligned}$$

Підставимо значення діелектричної проникності у формулу 4.8:

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot S}{b_{\text{пр}} + t_{\text{пр}}} \right)^{-1} = 0,12 \cdot 4,5 \cdot 14,7 \cdot \left(\lg \frac{2 \cdot 0,125}{0,15 + 0,035} \right)^{-1} \\ = 60,7 \text{ (пФ)}.$$

4.3.2 Найбільша взаємна індуктивність двох паралельних друкованих провідників

$$M = 0,02 \cdot \left(l_{\text{пр}} \cdot \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}} \right) \quad (4.10)$$

де: $l_{\text{пр}}=1,47$ см – довжина взаємного перекриття двох паралельних провідників (Визначено у САПР Altium);

$L_0=0,0275$ см – відстань між вісьовими лініями двох паралельних провідників. Тоді, за формулою 4.10:

$$M = 0,02 \cdot \left(l_{\text{пр}} \cdot \lg \frac{\sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}}}{L_0} - \sqrt{l_{\text{пр}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пр}} \right) = \\ = 0,02 \\ \cdot \left(4 \cdot \lg \frac{\sqrt{1,47^2 + 0,0275^2} + 1,47}{0,0275} - \sqrt{1,47^2 + 0,0275^2} + 1,47 \right) \\ = 0,104 \text{ (нГн)}$$

Отримані значення паразитної ємності ($C=60,7$ пФ) та взаємної індуктивності ($M=0,104$ нГн) друкованих провідників дозволяють стверджувати, що трасування провідників на друкованій платі не матиме негативного впливу на роботу приладу.

4.4 Розрахунок віброміцності друкованого вузла

Усі розрахунки в даному підрозділі виконано за методиками з [34].

Маси елементів друкованого вузлу внесено до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Маси елементів друкованого вузлу

Елемент	Маса, г	Кількість	Загальна маса, г
Мікросхема 10M25SAE144C8G	1,46	1	1,46
Мікросхема TP4056	0,084	1	0,084
Мікросхема TPS63001	0,15	1	0,15
Мікросхема MT3608	0,018	1	0,018
Конденсатор (типорозмір 0805)	0,0055	15	0,0825
Світлодіод (типорозмір 0603)	0,0055	2	0,011
Резистор (типорозмір 0805)	0,0055	12	0,066
Діод NSR0530HT1G	0,0045	1	0,0045
Транзистор PMF370XN	0,00598	1	0,00598
Роз'єм 5013310407 Molex	0,09	1	0,09
Роз'єм 503480-1800 Molex	0,03	1	0,03
Роз'єм 5025850770 Molex	0,28	1	0,28
Роз'єм ZX62-AB-5PA	0,1	1	0,1
Роз'єм 5025850370 Molex	0,16	1	0,16
Роз'єм 5051104091 Molex	0,15	1	0,15
		Σ	2,69

Розміри плати: $a \times b \times \delta = 65 \times 45 \times 1,5$ мм.

Питома вага матеріалу плати FR4 дорівнює $\rho=1850$ кг/м³. Отже, маса плати:

$$m_{\pi} = 0,065 \times 0,045 \times 0,0015 \times 1850 = 0,008116 \text{ (кг)}$$

Параметри FR4:

- гранична пластичність: $\sigma_T = 415 \text{ МПа}$;
- модуль Юнга: $E = 24 \text{ ГПа}$;
- коефіцієнт Пуассона: $\mu = 0,118$;
- показник затухання: $\varepsilon = 0,06$;
- питома щільність: $\nu = 18500 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$;
- коефіцієнт перенавантаження: $n=8$;
- коефіцієнт запасу міцності: $n_1=2$.

Варіанти закріплення друкованих плат:

<p>Спирання на 4 сторони</p> 	$\alpha = \pi^2 \cdot \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)$
<p>Спирання на 3 сторони</p> 	$\alpha = \pi^2 \cdot \sqrt{0,43 \cdot \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$
<p>Спирання на 3 сторони</p> 	$\alpha = \pi^2 \cdot \sqrt{1 + 0,43 \cdot \frac{a^2}{b^2}}$
<p>Жорстке закріплення по 4 сторонам</p> 	$\alpha = 22,37 \cdot \sqrt{1 + 0,61 \cdot \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^4}{b^4}}$

Рисунок 4.3 – Варіанти закріплення друкованого вузлу, та формули розрахунку коефіцієнта α

Обраний варіант закріплення друкованої плати – спирання на 4 сторони (рисунок 4.4).

Спирання на 4 сторони

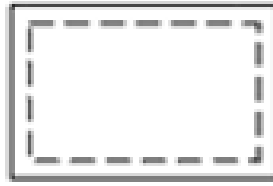


Рисунок 4.4 – Обраний тип закріплення друкованої плати

Визначимо коефіцієнт K_B :

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_e}{m_{\pi}}}}, \quad (4.11)$$

де: m_e – маса елементів;

m_{π} – маса плати.

За формулою 4.11:

$$K_B = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2,69}{8,12}}} = 0,866$$

Визначимо коефіцієнт α , враховуючи вибраний тип закріплення:

$$\alpha = \pi^2 \cdot \left(1 + \frac{a^2}{b^2}\right) = \pi^2 \cdot \left(1 + \frac{0,65^2}{0,45^2}\right) = 30,46$$

Циліндрична жорсткість D :

$$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (4.12)$$

де: μ – коефіцієнт Пуассона;

δ – товщина плати;

E – модуль Юнга.

Розрахуємо циліндричну жорсткість за формулою 4.12:

$$D = \frac{24 \cdot 10^9 \cdot 0,0015^3}{12 \cdot (1 - 0,118^2)} = 6,8453 \text{ (Н * м)}$$

Отже, власна частота коливань плати:

$$f_c = \frac{K_B \cdot \alpha}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot g}{v \cdot \delta}}, \quad (4.13)$$

де: D – циліндрична жорсткість;

v – питома щільність ;

g – гравітаційна стала;

δ – товщина плати.

Підставимо значення у формулу 4.13.

$$f_c = \frac{0,866 \cdot 30,46}{2 \cdot \pi \cdot 0,065^2} \cdot \sqrt{\frac{6,8453 \cdot 9,81}{18500 \cdot 0,0015}} \approx 1547,07 \text{ (Гц)}$$

Оскільки $1547,07 \geq 250$ Гц, то розроблювану друковану плату вважатимемо абсолютно жорсткою. Отже, додаткових засобів підвищення віброміцності не потрібно.

4.5 Розрахунок надійності друкованого вузла

Усі розрахунки в даному підрозділі виконано за методиками з [32, 34].

Задля розрахунку часу напрацювання до першої відмови потрібні базові значення інтенсивності відмов λ_0 для елементів друкованого вузла. Ця величина визначається експериментально, тож скористаємось значеннями λ_0 з [32, 34]. Взагалі, розрахунок експлуатаційної інтенсивності відмов має враховувати багато факторів, в тому числі і конструкційні особливості елементів. Але для академічних цілей буде достатньо базової інтенсивності відмов λ_0 , коефіцієнту

навантаження K_n , поправних коефіцієнтів температурного режиму a_t та зовнішніх впливів a_e (a_t та a_e взято з [36]).

Серед обраних складових експлуатаційної інтенсивності відмов єдиним не справочним значенням є коефіцієнт навантаження K_n . Розглянемо його розрахунок для деяких елементів. Для спрощення розглядатимемо лише найгірші випадки.

Конденсатори. Для конденсаторів коефіцієнт навантаження визначається по напрузі.

$$K_{n_k} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (4.14)$$

де: $U_{\text{роб}}$ – робоча напруга конденсатору;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга конденсатору.

Для керамічних конденсаторів у ланцюгу 3,3 В (C1-C6, C8-C13, C15), для номінальних напруг 50 В, 10 В, 25 В за формулою 4.14:

$$K_{n_{50}} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{3,3}{50} = 0,066;$$

$$K_{n_{10}} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{3,3}{10} = 0,33;$$

$$K_{n_{25}} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{3,3}{25} = 0,132.$$

Для конденсатору C7 у ланцюзі 5 В, з номінальною напругою 10 В:

$$K_n = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{5}{10} = 0,5$$

Для конденсатору C14 у ланцюзі 9,6 В, з номінальною напругою 25 В:

$$K_H = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{9,6}{25} = 0,384$$

Резистори. Для резисторів K_H визначається за напругою:

$$K_{H-p} = \frac{U_R^2}{R * P_{\text{ном}}}, \quad (4.15)$$

де: R – опір резистору;

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність резистору;

U_R – напруга на резисторі.

Для резисторів R1, R2 номіналом 4,7 кОм за формулою 4.15:

$$K_H = \frac{3.3^2}{4700 * 0,125} = 0,037$$

Для усіх інших резисторів, розраховані K_H наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти навантаження для усіх резисторів у схемі

Резистор	Номінал резистору, Ом	$U_{\text{роб}}, \text{В}$	K_H
R1	$4,7 \cdot 10^3$	3,3	0,037
R2	$4,7 \cdot 10^3$	3,3	0,037
R3	$1,2 \cdot 10^3$	5	0,0026
R4	0,4	0,01	0,2
R5	10^4	3,3	0,0001
R6	10^3	5	0,0031
R7	$2 \cdot 10^3$	5	0,0016
R8	10^3	5	0,0031
R9	10^3	5	0,0031
R10	100	5	0,0313
R11	$3,3 \cdot 10^4$	9,6	0,0003
R12	$2,2 \cdot 10^3$	9,6	0,0052

Світлодіоди. В нашому випадку розраховуватимемо K_n для світлодіодів за напругою, оскільки напруги, за яких працюють ці елементи, значно ближчі до максимальних значень (1,8 до 2 В максимальних для обох світлодіодів), ніж струми (~3 до 25 мА до максимальних).

Отже,

$$K_{n_c} = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}}, \quad (4.16)$$

де: $U_{\text{роб}}$ – пряма напруга на світлодіоді;

$U_{\text{ном}}$ – максимальна пряма напруга на світлодіоді.

Отже за формулою 4.16:

$$K_n = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{1,8}{2} = 0,9$$

Діод: в нашому випадку розраховуватимемо K_n для діоду за відношенням струму, що протікає через нього до максимального струму прямого зміщення, оскільки таке відношення буде значно більше, ніж відношення напруг:

$$K_n = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (4.17)$$

де: $I_{\text{роб}}$ – струм, що протікає через діод, увімкненого в прямому зміщенні;

$I_{\text{ном}}$ – максимальний струм прямого зміщення діоду.

Отже, за формулою 4.17

$$K_n = \frac{U_{\text{роб}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{1,8}{2} = 0,9$$

Транзистор: для транзисторів розрахунок коефіцієнту відбувається за струмом:

$$K_H = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (4.18)$$

де: $I_{\text{роб}}$ – напруга витоку відкритого транзистору;

$I_{\text{ном}}$ – максимальна напруга витоку.

Отже, за формулою 4.18:

$$K_H = \frac{1,4}{550} = 0,0025$$

Та коефіцієнт за потужністю, що виділяється:

$$K_H = \frac{P_{\text{роб}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (4.19)$$

де: $P_{\text{роб}}$ – потужність що виділяється у вигляді тепла;

$P_{\text{ном}}$ – максимальна потужність, що здатен розсіяти корпус транзистору.

За формулою 4.19:

$$K_H = \frac{P_{\text{роб}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{3 * 10^{-6}}{0,56} = 5,38 * 10^{-6}$$

Як бачимо, відношення потужностей дуже мале, через малий струм на напругу що падає на відкритому каналі, тому візьмемо коефіцієнт, розрахований за струмом.

Інші елементи. Для усіх інших елементів оберемо $K_H=1$. Інтенсивність відмов друкованої плати визначатимемо як суму інтенсивності відмов металізованих отворів та інтенсивності відмов шарів друкованої плати.

Дані для розрахунку часу напрацювання до першої відмови внесемо до таблиці 4.4. Кліматичне виконання приладу УХЛ1.1 встановлює максимальну температуру роботи в $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, спираючись на цю інформацію обираємо a_t . Для наземної рухомої електрорадіоапаратури $a_e=15$ [36].

Таблиця 4.4 – Показники надійності компонентів друкованого вузла

Елемент	Кількість	$\lambda_6, 10^{-6}/\text{год}$	K_n	a_t	a_e	$N \cdot \lambda_6 \cdot K_n (a_t \cdot a_e \cdot 10^{-6})/\text{год}$
Мікросхема TP4056	1	0,023	1	1	15	0,34500
Мікросхема 10M25SAE144C8G	1	0,023	1	1	15	0,34500
Мікросхема TPS63001	1	0,023	1	1	15	0,34500
Мікросхема MT3608	1	0,023	1	1	15	0,34500
Конденсатори C1-C6, C8, C11 (50 В)	8	0,022	0,066	0,4	15	0,06970
Конденсатор C7 (10 В)	1	0,022	0,5	0,4	15	0,06600
Конденсатори C9, C10, C12, C13 (10 В)	4	0,022	0,33	0,4	15	0,17424
Конденсатор C14 (25 В)	1	0,022	0,384	0,4	15	0,05069
Конденсатор C15 (25 В)	1	0,022	0,132	0,4	15	0,01742
Резистори R1,R2	2	0,044	0,037	0,2	15	0,00977
Резистор R3	1	0,044	0,026	0,2	15	0,00343
Резистор R4	1	0,044	0,2	0,2	15	0,06750
Резистор R5	1	0,044	0,0001	0,2	15	0,00001
Резистори R6, R8, R9	3	0,044	0,0031	0,2	15	0,00123
Резистор R7	1	0,044	0,0016	0,2	15	0,00021
Резистор R10	1	0,044	0,0313	0,2	15	0,00413
Резистор R11	1	0,044	0,0003	0,2	15	0,00004
Резистор R12	1	0,044	0,0052	0,2	15	0,00069
Діод	1	0,025	0,2	0,9	15	0,06750
Світлодіод	2	0,034	0,92	1	15	0,93840
Транзистор	1	0,044	0,0025	0,9	15	0,00149
Котушка індуктивності	2	0,033	1	0,8	15	0,79200
Роз'єми	6	0,062	1	1	15	5,58000
Пайка виводу	324	0,000265	1	1	15	0,33534
Мет. Отвори	130	0,0000325	1	1	15	0,06338
Шар ДП	4	0,001	1	1	15	0,06000
					Σ	10,65

Результуюча інтенсивність відмов $\lambda_p = 10,65 \cdot 10^{-6} (\text{год}^{-1})$.

Тоді час напрацювання до першої відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_p}, \quad (4.20)$$

де: λ_p – результуюча інтенсивність відмов.

$$T_{cp} = \frac{1}{10,65 * 10^{-6}} = 93927 \text{ (год)}$$

Залежність вірогідності безвідмовної роботи від часу роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda_p t}, \quad (4.21)$$

де:

λ_p – результуюча інтенсивність відмов;

t – час роботи.

За 4.21:

$$P(t) = e^{-10,65 * 10^{-6} * 93927}$$

Залежність вірогідності відмови від часу роботи

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-10,65 * 10^{-6} * 93927}$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом року:

$$P_{р\dot{ч}ін} = e^{-10,65 * 10^{-6} * 8760} = 0,9108$$

Ймовірність відмови протягом року:

$$Q_{р\dot{ч}ін} = 1 - P_{р\dot{ч}ін} = 0,0892$$

Визначаємо ресурс нашого виробу

$$P(t) = Q(t) = 0,5 = e^{-\lambda t} \quad (4.22)$$

звідки $t = T_R = 63500$ (год)

Графіки ймовірностей відмов і безвідмовної роботи протягом експлуатації наведені на рисунку 4.5.

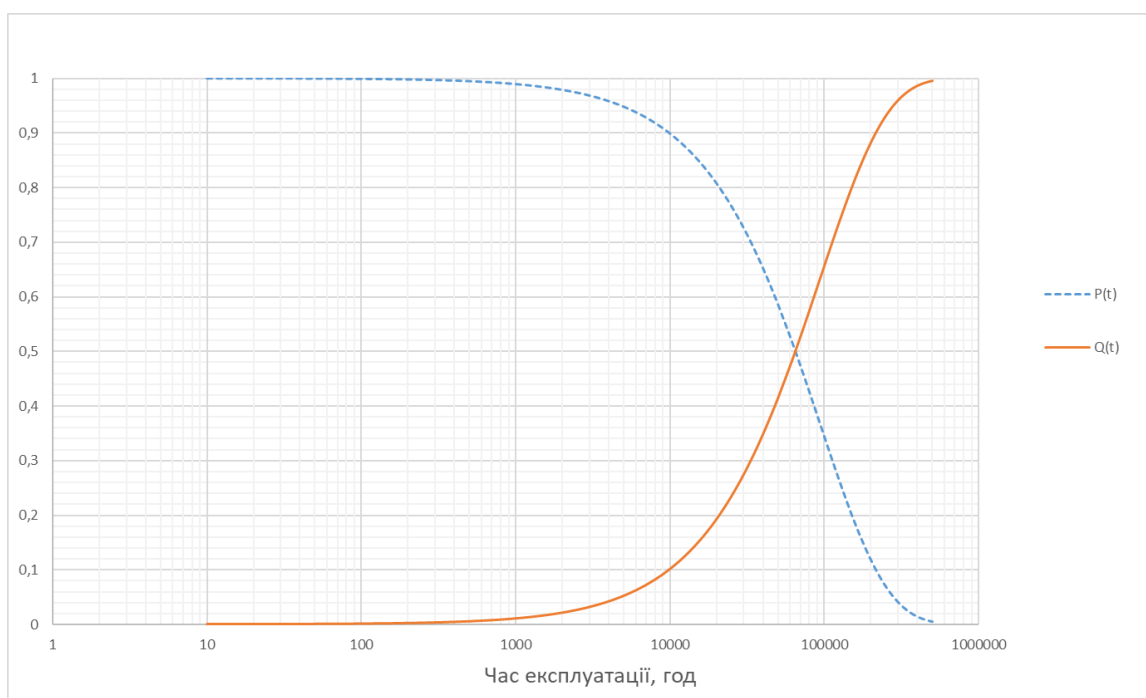


Рисунок 4.5 – Графіки залежності безвідмовної роботи і ймовірності відказу ДВ від часу

4.6 Оцінка тривалості роботи від акумулятору

Розрахуємо тривалість роботи пристрою в активному режимі від літій-полімерного акумулятору ємністю 2 А*год . Зазвичай, при 100% заряді акумулятор типорозміру має вихідну напругу 4.2 В. Стабілізатор TPS63001 живить схему стабільними 3,3 В, приймаючи будь-яку напругу з робочого діапазону напруги акумулятору (3 – 4,2 В) . Таким чином, не враховуючи деградацію ємності акумулятору, пристрій може спожити 2 А*год . Отже, тривалість роботи від батареї дорівнює $2/0,364 \approx 5,5 \text{ год}$.

Висновок до розділу

В даному розділі проведено розрахунки, що підтверджують коректність прийнятих конструкторських рішень та дотримання ТЗ. Серед усіх розрахунків варто виділити тепловий розрахунок найбільш вірогідного до перегріву елементу – мікросхеми TPS63001, що живить усі функціональні компоненти схеми. Розрахунок показав, що навіть при максимальній температурі функціонування

мікросхеми (+85 °C), вона зможе розсіяти потужність, що виділяється внаслідок роботи пристрою в активному режимі.

Визначено мінімальну ширину провідника, у тому числі з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги.

Розрахунок віброміцності плати показав, що вона є абсолютно жорсткою, частота власних коливань є рівною 1550 Гц.

Також виконано розрахунок ресурсу виробу – 63500 годин, що є значно більшим, ніж зазначено у ТЗ. Таке велике значення пояснюється тим, що розроблюваний блок не містить елементів, що мають велику інтенсивність відмов. У масштабах цілого пристрою, цей час буде зменшено, наприклад, підсвіткою дисплею, ресурс якої рівний 20000 годинам.

Виконано розрахунок часу роботи від акумулятору ємністю 2 А*год. Це значення є рівним 5,5 годинам. У ТЗ немає чітких вимог, скільки годин має працювати пристрій від акумулятору, але є чітке значення максимального струму споживання у активному режимі, що дорівнює 0,5 А. Пристрій споживає струм 0,364 А, тобто, вимогу виконано.

					<i>ДК52.201152.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Розділ 5 ПРОЕКТУВАННЯ У САПР ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ.

5.1 Проектування друкованого вузлу в Altium Designer

Процес розробки друкованих плат в середовищі Altium Designer виконувався в такій послідовності:

Створення проекту, налаштування САПР у режим роботи з метричною системою, завантаження шаблонів.

Створення бібліотеки компонентів. Бібліотека компонентів для даного проекту була створена вручну, у відповідність ГОСТ.

Наступним етапом було створення схеми електричної принципової. Зі створеної бібліотеки готові компоненти розміщуються на схемі та з'єднуються виходи елементів у відповідність до розробленої схеми.

Далі відбувається створення бібліотеки футпринтів, та 3D моделями корпусів елементів. Кожний футпринт з'єднується з відповідним компонентом раніше створеної бібліотеки компонентів.

Створення та розведення друкованої плати. Спочатку було створено правила трасування (design rules check) для обраного класу точності, з урахуванням прийнятої мінімальної ширини провідника 0,15 (розраховано у Розділі 4). Потім елементи були розташовані на друкованій платі з урахуванням сильнозв'язаних елементів. Далі проводилось трасування зі застосуванням інтерактивного (ручного) режиму та режиму “active route” – трасування конкретного елемента чи провідника. На рисунку 5.1 зображено готовий друкований вузол.

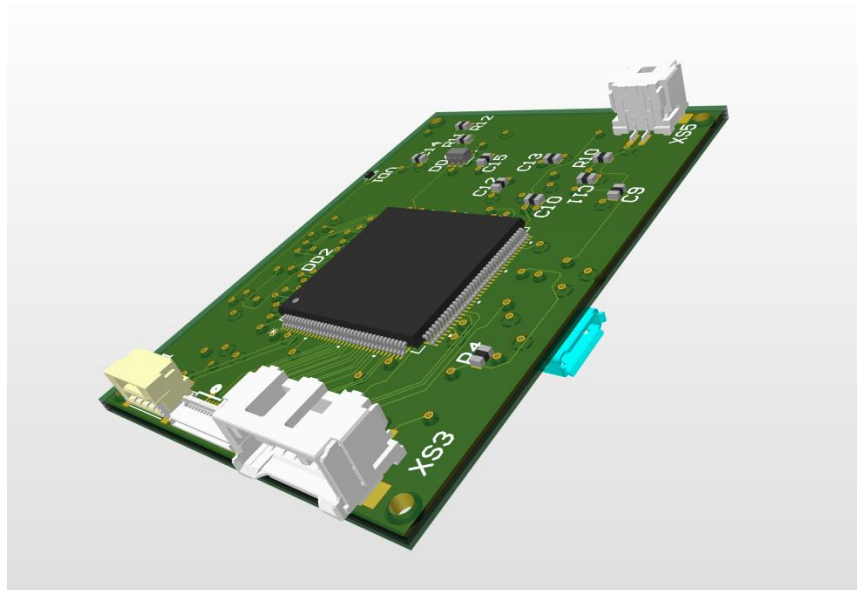


Рисунок 5.1 – Готовий друкований вузол

5.2 Алгоритми обробки даних та моделювання функціональних блоків

Інфрачервоний сенсор MLX90640 [13] являє собою матрицю 32x24 FIR сенсорів, обладнану цифровим інтерфейсом I²C (Розділ 1.3.3).

Всередині інтегровані датчик температури корпусу і вимірювач напруги живлення. Значення цих внутрішніх сенсорів, усіх ІЧ пікселів, зберігаються у внутрішній пам'яті і доступні для вичитування по протоколу I²C. Дані з датчику температури корпусу і вимірювача напруги слугують для калібрування при розрахунках температури. Повна блок-діаграма наведена на рисунку 5.2.

Робочий діапазон температур: -40°C - 85°C. Діапазон вимірюваних температур: -40°C ÷ 300°C, гарантована точність виробником, при вимірюваному діапазоні температур 0-100°C:

- $\pm 2^{\circ}\text{C}$, при температурах корпусу -40-0 та 50-85 °C;
- $\pm 1^{\circ}\text{C}$, при температурах корпусу 0-50 °C.

Випускається у двох варіантах оптичного поля зору:

1. 55° на 35°;
2. 110° на 75°.

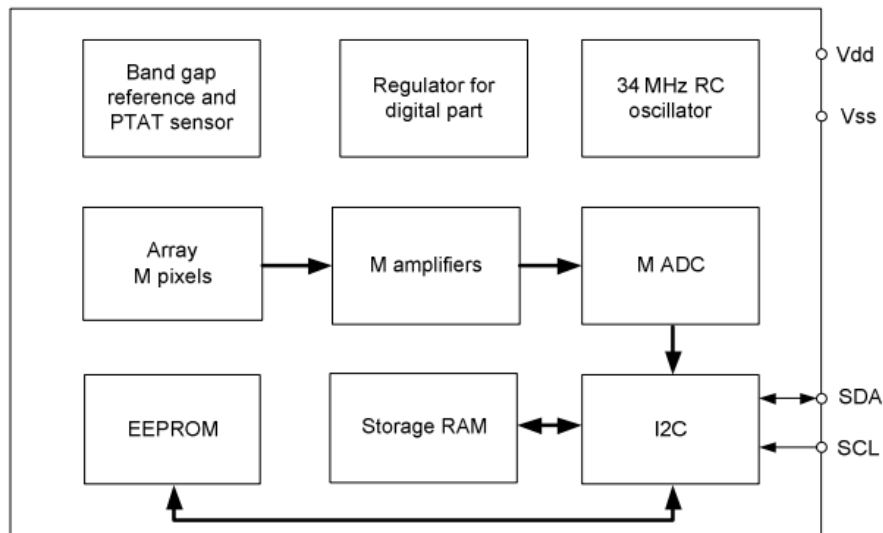


Рисунок 5.2 – Блок-діаграма сенсору MLX90640

У режимі вимірювання, залежно від обраної частоти кадрів (Fps) у реєстрі керування, значення з кожного ІЧ пікселю і значення температури корпусу самого датчика будуть оновлюватися в оперативній пам'яті кожні $\frac{2}{Fps}$ та $\frac{1}{Fps}$ секунд, відповідно. Це зв'язано з тим, що значення усіх ІЧ пікселів оновлюється не одночасно, а субкадрами (у шаховому порядку, або через рядок). Так, для 4 Гц частоти кадрів, кожний субкадр буде оновлюватись через пів секунди (рисунок 5.3). У цьому режимі зовнішній ведучий I²C пристрій має повний доступ до внутрішніх реєстрів і пам'яті сенсору. Датчик сигналізує завершення циклу вимірювання субкадру, встановленням у одиницю третім бітом статусного реєстру (адреса 0x8000). Нульовий біт зазначеного реєстру сигналізує, який саме субкадр було отримано.

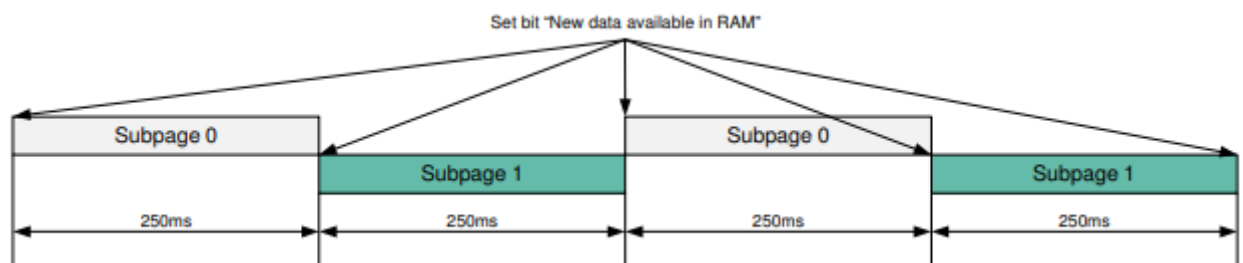


Рисунок 5.3 – Приклад інтервалів оновлення субкадрів

На рисунку 5.4 зображена карта пам'яті пристрою.

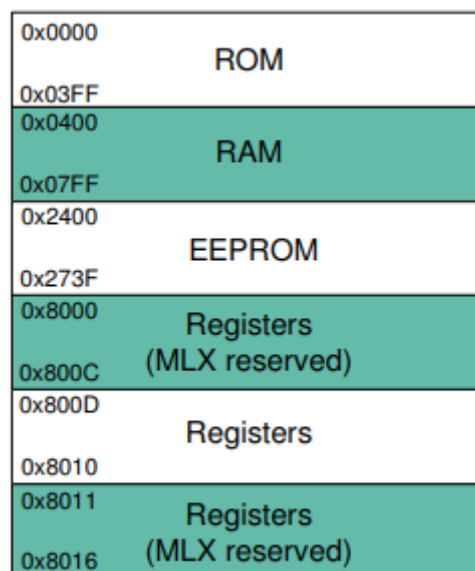


Рисунок 5.4 – Карта пам'яті MLX90640

5.2.1 Прототип блоку контролера ІЧ матриці MLX90640 на STM32.

За допомогою офіційної бібліотеки від компанії Melexis [37], та Mbed OS [38] була написана програма, що зчитує дані з сенсору по протоколу I²C та виконує обробку цих даних, щоб знайти значення температури для кожного пікселю (Додаток Б). Масив температур передається по протоколу Serial на ПК. Рисунок 5.5 ілюструє блок-схему прототипу, рисунок 5.6 зображує одну ітерацію циклу роботи мікроконтролера.

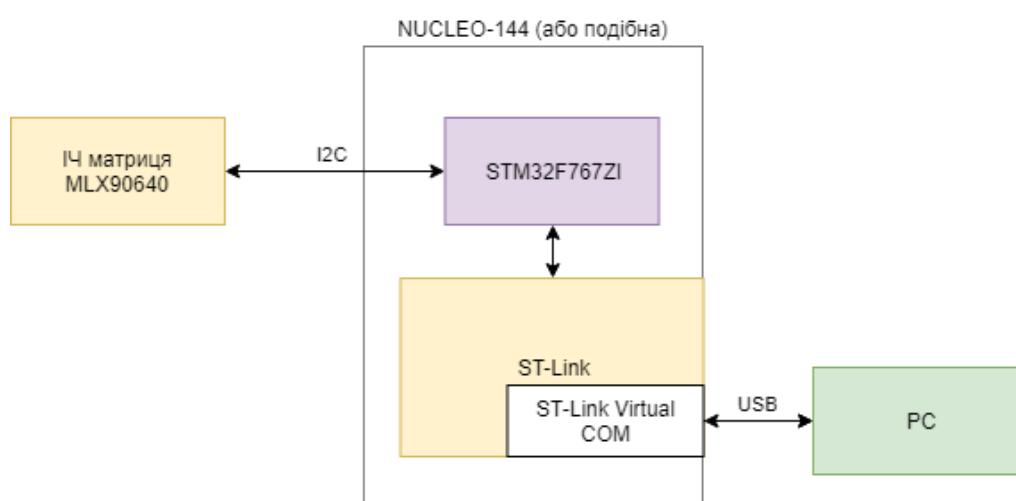


Рисунок 5.5 – Блок-схема прототипу контролера матриці на STM32

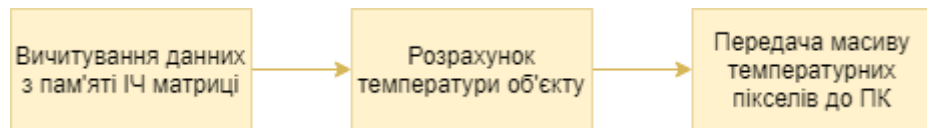


Рисунок 5.6 – Блок-схема алгоритму прототипа на STM32

5.2.2 Моделювання алгоритму інтерполяції у Matlab

Matlab (Matrix laboratory) – пакет прикладних програм для вирішення задач технічних розрахунків, та одночасно мова програмування. Потужний інструмент для вирішення багатьох інженерних задач.

За допомогою цього середовища була описана модель інтерполяції, що використовує сплайни Ерміта для масштабування зображення, отриманого з послідовного порту з контролера STM32, з підключеною ІЧ матрицею.

На рисунку 5.7 зображено кадр, отриманий з ІЧ матриці і вихідний кадр, який масштабовано та інтерпольовано у 16 разів (кольорова версія у Додатку Д).

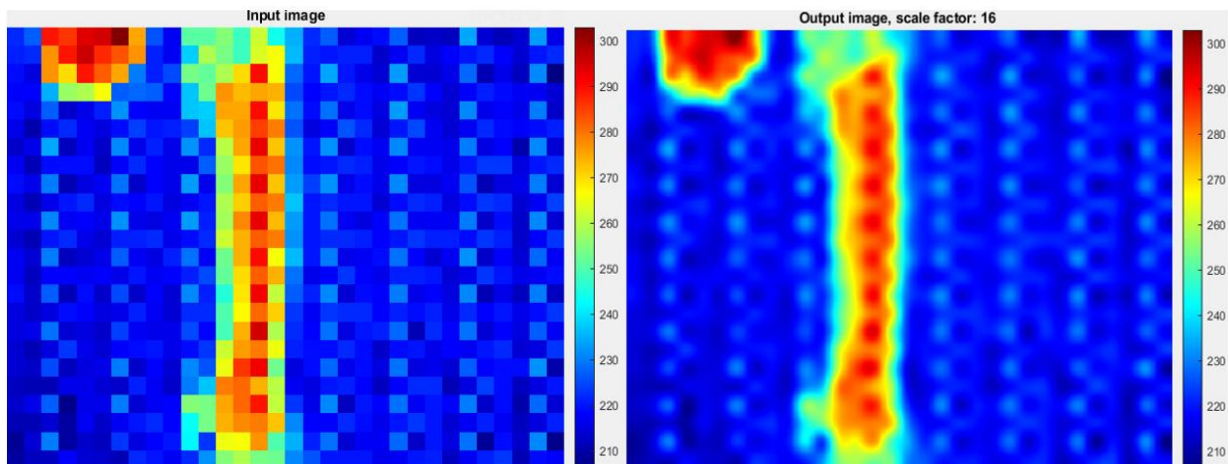


Рисунок 5.7 – Результат інтерполяції у 16 разів(первинна термограма зліва)

У Додатку В наведено Matlab код моделі.

Така модель дає уявлення про роботу функціональних блоків контролера матриці та інтерполяційного ядра, проте, алгоритм інтерполяції захищений за Matlab функцією *imresize()*. В наступному розділі описано алгоритм бікубічної інтерполяції сплайном Ерміта, написаного на мові C++.

5.2.3 Модель інтерполяційного ядра, написаного на мові C++

Інтерполяція зображень працює в двох вимірах і націлена на знаходження найкращого наближення в кольорі і яскравості пікселю, виходячи з значень сусідніх пікселів (рисунок 5.8)

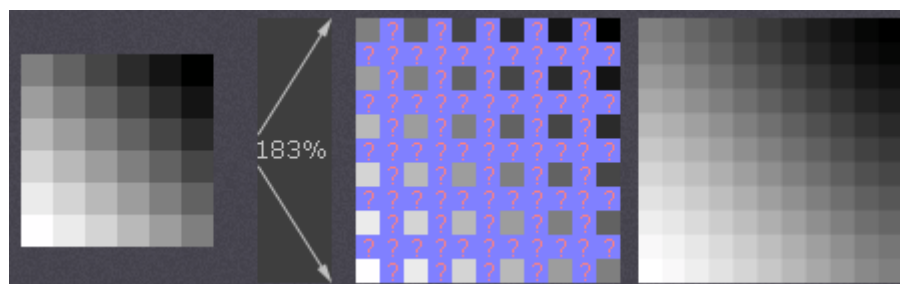


Рисунок 5.8 – Ілюстрація принципу інтерполяції зображень

У бікубічній інтерполяції для того, щоб знайти значення одного невідомого пікселю пікселю, використовується значення 16-ох сусідніх пікселів з оригінального зображення (рисунок 5.9). Оскільки вони знаходяться на різних відстанях, при розрахунку найближчі пікселі отримують більшу вагу.

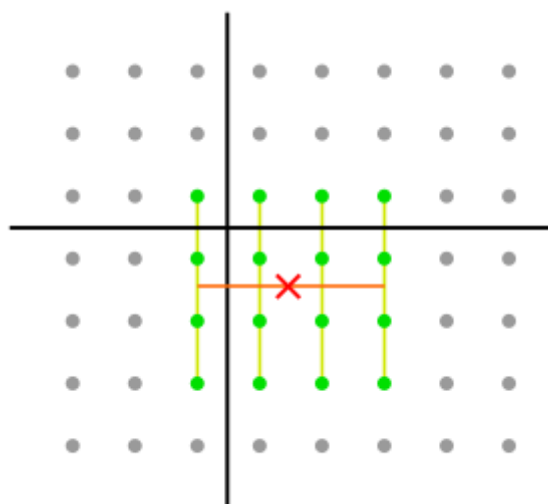


Рисунок 5.9 – Ілюстрація опорних пікселів.

На мові програмування C++ був описаний алгоритм збільшення роздільної здатності зображень, отриманих з матриці MLX90640. Програма приймає на вхід файл формату «.csv», зі 768 значеннями температур. Далі, в залежності від параметру *scale* формується масив вихідних значень температур, розміром

($768 * scale^2$). Функція *ResizeImage()* робить ітерацію по усім вихідним «пікселям», значення яких ще не обраховано. Функція *SampleBicubic()*, знаходить координати пікселю вхідної термограми, що пропорційно до коефіцієнту збільшення лежить наближче, та знаходить 16 точок поруч.

Функція *CubicHermite()* маючи контрольні точки (значення чотирьох пікселів, що лежать на одній лінії), та ваговий коефіцієнт, що визначає вагу кожної контрольної точки.

```
float CubicHermite (float A, float B, float C, float D, float t)
{
    float a = -A / 2.0f + (3.0f*B) / 2.0f - (3.0f*C) / 2.0f + D / 2.0f;
    float b = A - (5.0f*B) / 2.0f + 2.0f*C - D / 2.0f;
    float c = -A / 2.0f + C / 2.0f;
    float d = B;

    return a*t*t*t + b*t*t + c*t + d;
}
```

Рисунок 5.10 – Функція розрахунку значення пікселю, по чотирьом опорним точкам та ваговим коефіцієнтом t

На рисунку 5.11 зображено попередньо отриману термограму (кольорова версія у Додатку Д). Зображення було передано для порівняння до Matlab функції *imresize()* та до алгоритму інтерполяційного ядра, що описано на C++.

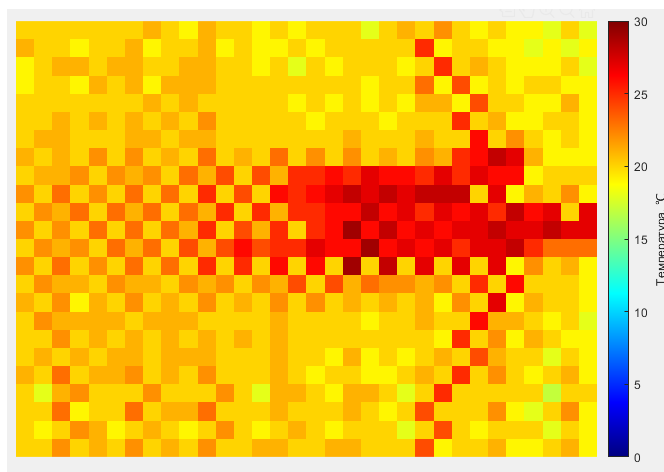


Рисунок 5.11 – Попередня термограма(отримана з MLX90640)

На рисунку 5.12 зображено порівняння результуючих кадрів з Matlab функції, та програми, написаної на C++.

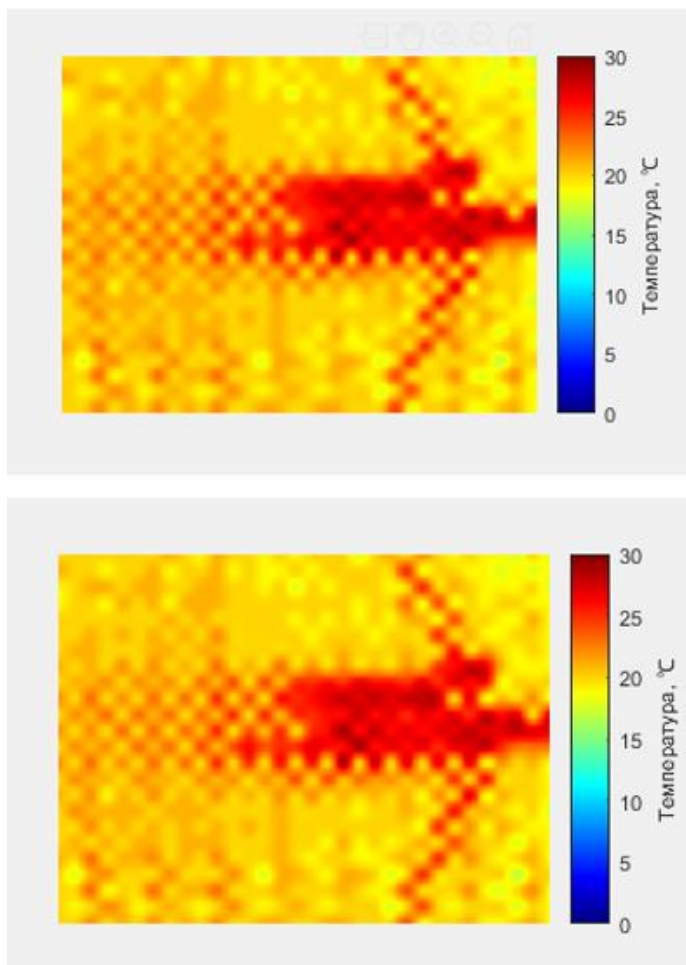


Рисунок 5.12 – Порівняння вихідних інтерпольованих термограмм з Matlab(вище), та C++ реалізації(нижче)

У Додатку Г наведено вихідний код описаного алгоритму.

Висновок до розділу

У розділі розглянуто етапи проектування друкованого вузлу у САПР Altium Designer, описано підхід до прототипування і моделювання роботи окремих функціональних блоків усередині ПЛІС. Так, було імплементовано прототип контролеру ІЧ матриці MLX90640 компанії Melexis з використанням плати для відладки – Nucleo-144 на STM32F767. За допомогою реалізованого контролеру з'явилась можливість моделювати інші частини блоку обробки значень,

використовуючи реальні значення температур, отриманого з ІЧ матриці. Так, у середовищі Matlab була спроектована модель інтерполяції кадрів, що отримуються з прототипу контролера, з використанням кубічного сплайну Ерміта.

					ДК52.201152.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ВИСНОВКИ

У першому розділі розглянуто концепції, що використовуються у приладах тепловізійного бачення, порівняно комерційні моделі тепловізорів за їх характеристиками, а саме – родільна здатність матриці, частота оновлення зображення, діапазон вимірюваних температур, похибка вимірювання теплової чутливості, наявність оптичної камери для накладання контурів об’єктів у кадрі, спосіб відображення тепловізійної мапи. Проаналізовані вдалі конструктивні рішення, які в подальшому будуть використовуватись у розробці пристрою. Виконано попередній патентний пошук. Наведено основні теоретичні відомості підходів, що будуть використовуватись у проекті.

У другому розділі було виконано підбір мікросхеми контролеру заряду акумулятора, стабілізації напруги з акумулятору, підвищуючого конвертора напруги для живлення підсвітки дисплею. Також була відібрана ПЛІС із серії, що вимагалась умовами технічного завдання.

Також були розглянуті схемотехнічні рішення, що були реалізовані у блоці керування тепловізору, та розраховані значення резисторів для встановлення режиму роботи підвищуючого конвертору, резистору для визначення максимального струму заряду акумулятора. Обґрунтовано встановлення конденсаторів біля виводів живлення мікросхем.

У третьому розділі було обрано тип та матеріал друкованої плати – чотиришарова плата, матеріал – FR4. Метод виготовлення – комбінований позитивний, оскільки цей спосіб є надійним і відносно дешевим порівняно з хімічним та адитивним.

Виконано огляд існуючих класів точності друкованих плат за ГОСТ 23571-86, та обрано клас, за яким буде проектуватись друкований вузол. Рішення прийнято на користь п’ятого класу точності, з шириною провідників 0,15 мм. Такий вибір мотивовано тим, що потрібно мінімізувати зазори, так як маємо велику кількість виводів ПЛІС (144 контакти).

Виділили сильнозв'язані елементи – пари DD2-XS2 та DD2-XS6, що були розміщені, та трасування провідників яких виконувалось у першу чергу.

Трасування виконувалось із застосуванням інтерактивного (ручного) режиму та режиму “active route” – трасування конкретного елемента чи провідника.

В четвертому розділі проведено розрахунки, що підтверджують коректність прийнятих конструкторських рішень та дотримання ТЗ. Серед усіх розрахунків варто виділити тепловий розрахунок найбільш вірогідного до перегріву елемента – мікросхеми TPS63001, що живить усі функціональні компоненти схеми. Розрахунок показав, що навіть при максимальній температурі функціонування мікросхеми (+85 °C), вона зможе розсіяти потужність, що виділяється внаслідок роботи пристрою в активному режимі.

Визначено мінімальну ширину провідника, у тому числі з урахуванням допустимого падіння на ньому напруги.

Розрахунок віброміцності плати показав, що вона є абсолютно жорсткою, частота власних коливань є рівною 1550 Гц.

Також виконано розрахунок ресурсу виробу – 63500 годин, що є значно більшим, ніж зазначено у ТЗ. Таке велике значення пояснюється тим, що розроблюваний блок не містить елементів, що мають велику інтенсивність відмов. У масштабах цілого пристрою, цей час буде зменшено, наприклад, підсвіткою дисплею, ресурс якої рівний 20000 годинам.

Виконано розрахунок часу роботи від акумулятору ємністю 2 А*год. Це значення є рівним 5,5 годинам. У ТЗ немає чітких вимог, скільки годин має працювати пристрій від акумулятору, але є чітке значення максимального струму споживання у активному режимі, що дорівнює 0,5 А. Пристрій споживає струм 0,364 А, тобто, вимогу виконано.

У п'ятому розділі розглянуто етапи проектування друкованого вузлу у САПР Altium Designer, описано підхід до прототипування і моделювання роботи окремих функціональних блоків усередині ПЛІС. Так, було імплементовано

прототип контролеру ІЧ матриці MLX90640 компанії Melexis з використанням плати для відладки - Nucleo-144 на STM32F767. За допомогою реалізованого контролеру з'явилась можливість моделювати інші частини блоку обробки значень, використовуючи реальні значення температур, отриманого з ІЧ матриці. Так, у середовищі Matlab була спроектована модель інтерполяції кадрів, що отримуються з прототипу контролеру, з використанням кубічного сплайну Ерміта.

Згідно теми дипломного проекту було виконано впровадження розробки на базі ФОП Сахаров Д.Ю. Також було зроблено публікацію по темі даного дипломного проекту на XVIII Всеукраїнській науковій конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі», підсекція «Електротехніка та електроніка».

					<i>ДК52.201152.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. How Does Thermal Imaging Work. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/31nVVdZ>.
2. В Україні комунальні тарифи можуть підвищити ще на 10-20%: графік подорожчання. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2UfPGUy>.
3. Аналіз втрат тепла в будинку. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/31o73r9>.
4. Інфрачервоне випромінювання. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2wN4EZ6>.
5. World Intellectual Property Organization. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2KMс9rc>.
6. (US20190147569) FUSED IMAGE OPTIMIZATION SYSTEMS AND METHODS. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2WXMНpr>.
7. Масштабування зображення. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2WYmGGt>.
8. Інтерполяція. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2I85I5E>.
9. Комп'ютерна графіка. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2I94Ecr>.
10. ПЛІС. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2KCYIQ1>.
11. UM10204. I2C-bus specification and user manual. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2XG9KIQ>.
12. I2C Info – I2C Bus, Interface and Protocol. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://i2c.info/>.
13. Far infrared thermal sensor array. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2ZiJ4ba>.

14. BQ21040 0.8-A, Single-Input, Single Cell Li-Ion and Li-Pol Battery Charger. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2WZJ4PM>.
15. MCP73811/2. Simple, Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion/Li-Polymer Charge Management Controllers. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2I7SXCJ>.
16. TP4056 1A Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2I6ao6w>.
17. TPS6300x High-Efficient Single Inductor Buck-Boost Converter With 1.8-A Switches. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2WwGeNM>.
18. TPS61322 6.5- μ A Quiescent current, 1.8-A switch current boost converter. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2ME4LRi>.
19. RPM-1.0 DC/DC Converter. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2IwsayV>.
20. MT3608 AEROSEMI High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2WYm8jL>.
21. LM2621 Low Input Voltage, Step-Up DC-DC Converter. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2KGNeoY>.
22. TPS61170 1.2-A High-Voltage Boost Converter in 2-mm x 2-mm² QFN Package. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2ZI3TTj>.
23. Intel® MAX® 10 FPGA Device Overview. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://intel.ly/2Ka85BU>.

24. Li-Ion & LiPoly Batteries. All about the power packs that propel your projects. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2wLAhSC>.
25. BU-409: Charging Lithium-ion. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2ZeJlM8>.
26. X7R, X5R, C0G...: A Concise Guide to Ceramic Capacitor Types. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2Zh4tkY>.
27. Підтягуючий резистор. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2wMdrdH>.
28. I2C Bus Pullup Resistor Calculation. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2F4tbNE>.
29. N-channel TrenchMOS extremely low level FET. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2KMdK0a>.
30. OV7670/OV7171 CMOS VGA (640x480) Camera Chip. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2RchDNs>
31. MOP-TFT320240 LCD Display. MatrixOrbital. Datasheet. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/31tNqOn>
32. Друковані плати. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2Kd7eAi>.
33. Класи точності друкованих плат. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2EYYERq>.
34. Губар В. Г. Курс лекцій по ФТОК. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/31nhlYu>.
35. Boost Converters. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://bit.ly/2XLxTHm>.
36. Савельев Л. Я. Овчинников В. Л. Конструирование ЭВМ и систем: Учебник для техн. вузов по спец. «Электрон. выч. маш.» — М.: Высш. шк., 1984. – 248 с.

37. GitHub – melexis/mlx90640-library. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://bit.ly/2WqUg3G>.

38. Open-source RTOS for IoT development | Mbed. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://bit.ly/2WwAEjk>.

ГОСТ 12.2.007-75 Система стандартов безопасности труда ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ Общие требования безопасности

ГОСТ 15150-69 МАШИНЫ, ПРИБОРЫ И ДРУГИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 23571-86 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ Основные параметры конструкции.

ГОСТ 23752-79 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ Общие технические условия.

ГОСТ 29137-91 ФОРМОВКА ВЫВОДОВ И УСТАНОВКА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ Общие требования и нормы конструирования.

ГОСТ Р 50621-93 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ ОДНО- И ДВУСТОРОННИЕ С НЕМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ Общие технические требования

ДСТУ 3008:2015 ЗВІТИ У СФЕРІ НАУКИ І ТЕХНІКИ Структура та правила оформлювання

ДСТУ 2646-94 ПЛАТИ ДРУКОВАНІ Терміни та визначення

ОСТ 4.010.022 – 85 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ Методы конструирования и расчёта

Додаток А – Технічне завдання

ПОГОДЖЕНО, ЗАТВЕРДЖЕНО

Керівник ФОП Сахаров Дмитро Юрійович

Д.Ю. Сахаров

Технічне завдання на проект:

1 Найменування та галузь використання

Тепловізійний пристрій. Використовується для детектування витоків тепла та порушень у теплоізоляції будівель.

2 Підстава для розробки

Підставою для розробки є завдання на дипломний проект згідно наказу по НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» №.1405с від 27.05.2019 р.

3 Мета і призначення розробки

Блок керування для тепловізійного пристрою, щоб мав змогу приймати значення з ІЧ сенсору, та з оптичної камери, знаходити температуру об'єктів у полі зору, з точністю, встановленою ІЧ сенсором. Зображення з ІЧ сенсору та камери має накладатись і подаватись на дисплей.

4 Технічні вимоги

4.1 Склад виробу й вимоги до пристрою, що розробляється.

Пристрій являє собою моноблочну конструкцію, яка містить друкований вузол з роз'ємами для підключення оптичної камери, ІЧ сенсору, LCD дисплею, акумулятору, роз'єму для заряду, клавіатури для реалізації меню тепловізора.

4.2 Показники призначення.

Пристрій повинен забезпечувати:

- цифрову обробку результатів вимірювання;
- цифрове калібрування;
- накладання зображень;
- вивід на LCD дисплей.

4.2.1 Вимоги до надійності.

Ресурс виробу повинен бути не менше 20000 год, враховуючи те, що даний пристрій є тільки вузлом для підключення так контролю функціональних блоків.

4.2.2 Вимоги до технологічності.

Орієнтовані на передові прийоми виготовлення деталей і складання.

4.2.3 Вимоги до рівня уніфікації й стандартизації.

Для виготовлення пристрою застосувати стандартні, уніфіковані деталі та вироби.

4.2.4 Вимоги безпеки обслуговування.

Керуватися загальними вимогами безпеки до апаратури низької напруги ГОСТ 12.2.007-75.

4.2.5 Вимоги до складових частин виробу, сировини, вихідних і експлуатаційних матеріалів.

Для виробництва пристрою повинні використовуватися матеріали імпортного виробництва, які можливо купити та замінити в Україні, або власна елементна база, яка розробляється в Україні.

4.2.6 Умови експлуатації.

Кліматичне виконання УХЛ1.1 по ГОСТ 15150-69.

4.2.7 Вимоги до транспортування і зберігання.

Група умов зберігання Л1 по ГОСТ 15150-69. Зберігати в зачинених, опалювальних та вентильованих приміщеннях, в яких забезпечуються наступні умови: температура повітря $+5...+40^{\circ}\text{C}$, відносна вологість повітря 60% при 20°C (середньорічне значення), атмосферний тиск $84...106\text{кПа}$.

Транспортувати автомобільним, залізничним або авіаційним видами транспорту в спеціальній транспортній тарі. Умови транспортування середні (С) по ГОСТ 23216-78.

4.2.8 Додаткові технічні вимоги.

Додаткові технічні характеристики наведені в таблиці А.1:

Таблиця А.1 – Додаткові технічні характеристики.

Температурний режим	$-15^{\circ}\text{C} ... +40^{\circ}\text{C}$
Вологість	0 % ... 99 %
Габаритні розміри	не більше 80х60х15
Маса друкованого вузлу	не більше 30 г
Живлення	$5\text{ В} \pm 5\%$ (для заряду)
Струм споживання	не більше 500 мА у активному режимі.

- У якості FIR сенсора використати MLX90640 компанії Melexis. Так як роздільна здатність сенсора лише 24×32 пікселі, у пристрої має бути реалізований блок масштабування та інтерполяції зображення.
- Пристрій має бути здатний накладати зображення з оптичного сенсора – камери OV7670 та виводити тепловізійну мапу на LCD дисплей MOP-TFT320240 Matrix Orbital, підсвітка якого живиться напругою 9,6 В.
- Контролер FIR матриці, блок масштабування та інтерполяції, блок накладання зображень, контролер LCD дисплею реалізувати всередині ПЛІС.
- Програмовану матрицю обрати з лінійки Intel MAX 10, вибір якої зумовлено наявністю внутрішньої flash пам'яті, та великою кількістю внутрішніх функціональних блоків.
- Пристрій має бути портативним та живитися від однієї li-po або li-ion батареї.
- Реалізувати меню, що дозволяло б налаштовувати пристрій. Спосіб керування меню – клавіатура на 5 кнопок (передбачити роз'єм).
- Заряджання акумулятору - від роз'єму micro USB.

5 Результати роботи

5.1 Результати даної роботи можуть бути використані як вихідна документація по створенню прототипу пристрою, його конфігурації, налагодження й подальшого впровадження в серійне виробництво як ASIC мікросхем на основі дизайну, імplementованого у ПЛІС, так і виробництво цілого приладу по технічній документації.

5.2 Дана робота (звітна документація) після виконання надається на кафедру КЕОА для подальшого захисту й зберігання як навчальної документації.

6 Робота повинна містити в собі документи

- пояснювальну записку (формату А4, до 100 аркушів) ;

- схему електричну принципову та перелік елементів (формату А1, А4 відповідно) ;
- креслення друкованої плати (формату А1) ;
- складальне креслення плати та специфікацію (формату А1, А4 відповідно);
- додатки (формату А4).

7 Економічні показники

В умовах даного проекту не розглядаються, оскільки це є першою ітерацією прототипування.

8 Етапи розробки

Таблиця А.2 – Етапи розробки

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Час виконання етапів проекту
1	Аналіз технічного завдання	16.03.19-26.03.19
2	Вибір елементної бази та друкованої плати	26.03.19-02.04.19
3	Схемо-технічне проектування	02.04.19-09.04.19
4	Виконання креслення схеми електричної принципової	09.04.19-23.04.19
5	Проектування друкованого вузла у Altium Designer	23.04.19-30.04.19
6	Конструкторсько-технологічні розрахунки	30.04.19-03.05.19
7	Електричний розрахунок друкованої плати	03.05.19-07.05.19
8	Розрахунок віброміцності ДП	07.05.19-14.05.19
9	Розрахунок теплового режиму стабілізатора напруги	14.05.19-21.05.19
10	Виконання креслень друкованої плати та складального креслення друкованого вузла	21.05.19-28.05.19
11	Оформлення пояснювальної записки	28.05.19-12.06.19

Додаток Б – Програмна реалізація контролеру для MLX90640(C++, STM32)

```
#include <mbed.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "stm32f7xx.h"
#include "Serial.h"
#include "MLX90640_API/MLX90640_API.h"
#include "MLX90640_API/MLX90640_I2C_Driver.h"

#define MIN_TEMP                -40
#define MAX_TEMP                300

// Разрешение экрана

// Разрешение исходной термограммы
#define termWidth                32
#define termHeight               24

Serial uart(SERIAL_TX, SERIAL_RX);

static paramsMLX90640 params;
static uint16_t *Frame;
static uint16_t *eeMLX90640;
static float *TermoImage;
static int16_t *TermoImage16;

static uint16_t PaletteSteps = 0;

const float FPS_rates[] = {0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64};

void send_to_pc()//Функція читає дані з I2C матриці та виводить їх у
последовний порт
{
    for(int i = 0 ; i<768 ; i++)
    {
        uart.printf("%03d_%03x\n\r",i, TermoImage16[i]);///Виводимо
    }
}

//=====

int main()
{
    int result;
```

```

float minTemp = 0;
float maxTemp = 0;
float minTempNew = SCALE_DEFAULT_MIN;
float maxTempNew = SCALE_DEFAULT_MAX;

MLX90640_I2CInit();
uart.baud(115200);

char FPS_Idx = 4;//64Hz/per subfpage

Frame = (uint16_t*)malloc((834 << 1)*sizeof(char));

eeMLX90640 = (uint16_t*)malloc((832 << 1)*sizeof(char));

TermoImage = (float*)malloc((768 << 2)*sizeof(char));
TermoImage16 = (int16_t*)malloc((768 << 1)*sizeof(char));

result = MLX90640_DumpEE (0x33, eeMLX90640); //the whole EEPROM is
stored in the eeMLX90640 array

result = MLX90640_ExtractParameters(eeMLX90640, &params);

result = MLX90640_SetRefreshRate(0x33, FPS_Idx);

while (1)
{
    // Формирование новой шкалы если необходимо
    if ((minTempNew != minTemp) || (maxTempNew != maxTemp))
    {
        // Расширяем шкалу если диапазон получился меньше
MIN_TEMPSCALE_DELTA
        float Delta = maxTempNew - minTempNew;
        if (Delta < MIN_TEMPSCALE_DELTA)
        {
            minTempNew -= (MIN_TEMPSCALE_DELTA - Delta) / 2;
            maxTempNew += (MIN_TEMPSCALE_DELTA - Delta) / 2;
        }
        minTemp = minTempNew;
        maxTemp = maxTempNew;
        // Чтение фрейма из сенсора
        result = MLX90640_GetFrameData(0x33, Frame);
        // Считаем и выводим несколько параметров, считанных из mlx90640
        float Vdd = MLX90640_GetVdd(Frame, &params);
    }
}

```

```

float Ta = MLX90640_GetTa(Frame, &params);
    // Расчёт матрицы температур
float emissivity = 0.95;
float tr = Ta - 8;
MLX90640_CalculateTo(Frame, &params, emissivity, tr, ThermoImage);
    // Копируем температуры в целочисленный массив для упрощения
дальнейших расчётов
    for (uint16_t i = 0; i < 768; i++)
        ThermoImage16[i] = int(ThermoImage[i]);
        // Считаем и выводим температуру в центре экрана
float MainTemp =
    ThermoImage[termWidth * ((termHeight >> 1) - 1) + ((termWidth
>> 1) - 1)] +
    ThermoImage[termWidth * ((termHeight >> 1) - 1) + (termWidth
>> 1)] +
    ThermoImage[termWidth * (termHeight >> 1) + ((termWidth >> 1)
- 1)] +
    ThermoImage[termWidth * (termHeight >> 1) + (termWidth >> 1)];
MainTemp /= 4;

// Поиск и вывод минимальной и максимальной температуры в кадре
float minT = 300;
float maxT = -40;
for (uint16_t i = 0; i < 768; i++)
{
    if (maxT < ThermoImage[i])
        maxT = ThermoImage[i];
    if (minT > ThermoImage[i])
        minT = ThermoImage[i];
}
if (maxT > MAX_TEMP)
    maxT = MAX_TEMP;
if (minT < MIN_TEMP)
    minT = MIN_TEMP;

#ifdef AUTOSCALE_MODE
    minTempNew = minT;
    maxTempNew = maxT;
#endif

    send_to_pc();
}
}

//=====

```

Додаток В – Matlab код моделі інтерполяції (дані з Serial)

```
WIDTH = 32
HEIGHT = 24
COLOR_DEPTH = 400
SCALE_FACTOR = 2
% Delete Opened Ports in MATLAB
delete(instrfind)
% Create a Serial Object
ser = serial('COM3', 'BaudRate',115200, 'Timeout',10);
DATA_SIZE = 768;
min_num = 0;
max_num = 0;
inFrame = zeros(HEIGHT,WIDTH);

fopen(ser);

himage = imshow(imresize(inFrame, SCALE_FACTOR, 'bicubic'), [min_num max_num])
    title(sprintf("Output image, scale factor: %d ", SCALE_FACTOR));
    truesize([HEIGHT*20 WIDTH*20])
    colorbar;
    colormap(jet(max_num));

while true
    pixel = fscanf(ser, "%03d_%03x");
    disp(pixel);
    column = mod(pixel(1), 32) + 1;
    row = floor(pixel(1)/32 )+ 1;

    inFrame(row, column) = pixel(2);

    disp(pixel);
    if pixel(1) == 767
        max_num=max(inFrame(:));
        min_num=min(inFrame(:));
        outFrame = imresize(inFrame, SCALE_FACTOR, 'bicubic');
        himage = imshow(outFrame, [min_num max_num])
        title(sprintf("Output image, scale factor: %d ", SCALE_FACTOR));
        truesize([HEIGHT*20 WIDTH*20])
        colorbar;
        colormap(jet(max_num));
        drawnow
    end
end

fclose(ser);
```


Додаток Г – C++ реалізація алгоритму бікубічної інтерполяції

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS

#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <cmath>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <iostream>
#include <array>
#include <vector>
#include <windows.h> // for bitmap headers. Sorry non windows people!

#define CLAMP(v, min, max) if (v < min) { v = min; } else if (v > max) { v =
max; }

struct SImageData
{
    SImageData()
        : m_width(32)
        , m_height(24)
        , m_pixels(0)
    {}

    long m_width;
    long m_height ;
    std::vector<unsigned short> m_pixels;
};

// t is a value that goes from 0 to 1 to interpolate in a C1 continuous way
across uniformly sampled data points.
// when t is 0, this will return B. When t is 1, this will return C.
Inbetween values will return an interpolation
// between B and C. A and B are used to calculate slopes at the edges.
float CubicHermite (float A, float B, float C, float D, float t)
{
    float a = -A / 2.0f + (3.0f*B) / 2.0f - (3.0f*C) / 2.0f + D / 2.0f;
    float b = A - (5.0f*B) / 2.0f + 2.0f*C - D / 2.0f;
    float c = -A / 2.0f + C / 2.0f;
    float d = B;

    return a*t*t*t + b*t*t + c*t + d;
}
```

```

const unsigned short GetPixelClamped (const SImageData &image, int x, int y)
{
    CLAMP(x, 0, image.m_width - 1);
    CLAMP(y, 0, image.m_height - 1);
    auto val = image.m_pixels[(y * image.m_width) + x];
    return val;
}

unsigned short SampleBicubic (const SImageData &image, float u, float v)
{
    // calculate coordinates
    float x = (u * (image.m_width-1));
    int xint = int(x);
    float xfraction = x - floor(x);

    float y = (v * (image.m_height-1));
    int yint = int(y);
    float yfraction = y - floor(y);

    // 1st row
    auto p00 = GetPixelClamped(image, xint - 1, yint - 1);
    auto p10 = GetPixelClamped(image, xint + 0, yint - 1);
    auto p20 = GetPixelClamped(image, xint + 1, yint - 1);
    auto p30 = GetPixelClamped(image, xint + 2, yint - 1);

    // 2nd row
    auto p01 = GetPixelClamped(image, xint - 1, yint + 0);
    auto p11 = GetPixelClamped(image, xint + 0, yint + 0);
    auto p21 = GetPixelClamped(image, xint + 1, yint + 0);
    auto p31 = GetPixelClamped(image, xint + 2, yint + 0);

    // 3rd row
    auto p02 = GetPixelClamped(image, xint - 1, yint + 1);
    auto p12 = GetPixelClamped(image, xint + 0, yint + 1);
    auto p22 = GetPixelClamped(image, xint + 1, yint + 1);
    auto p32 = GetPixelClamped(image, xint + 2, yint + 1);

    // 4th row
    auto p03 = GetPixelClamped(image, xint - 1, yint + 2);
    auto p13 = GetPixelClamped(image, xint + 0, yint + 2);
    auto p23 = GetPixelClamped(image, xint + 1, yint + 2);
    auto p33 = GetPixelClamped(image, xint + 2, yint + 2);

```

```

        // interpolate bi-cubically!
        // Clamp the values since the curve can put the value below 0 or above
65535

        float col0 = CubicHermite(p00, p10, p20, p30, xfraction);
        float col1 = CubicHermite(p01, p11, p21, p31, xfraction);
        float col2 = CubicHermite(p02, p12, p22, p32, xfraction);
        float col3 = CubicHermite(p03, p13, p23, p33, xfraction);
        float value = CubicHermite(col0, col1, col2, col3, yfraction);
        CLAMP(value, 0.0f, 65535.0f);

        return short(value*10);
    }

void ResizeImage (const SImageData &srcImage, SImageData &destImage, float
scale)
{
    destImage.m_width = short(float(srcImage.m_width)*scale);
    destImage.m_height = short(float(srcImage.m_height)*scale);

    destImage.m_pixels.resize(destImage.m_width*destImage.m_height);

    unsigned short *row = &destImage.m_pixels[0];
    for (int y = 0; y < destImage.m_height; ++y)
    {
        float v = float(y) / float(destImage.m_height-1);
        unsigned short *destPixel = row;
        for (int x = 0; x < destImage.m_width; ++x)
        {
            float u = float(x) / float(destImage.m_width-1);

            unsigned short sample;
            sample = SampleBicubic(srcImage, u, v);

            *destPixel = sample;
            destPixel += 1;
        }
        row += destImage.m_width;
    }
}

void readCsv(const char* filename, SImageData& image)
{
    std::fstream file;
    file.open(filename, std::fstream::in);

```

```

std::string line = "", val = "";
// Iterate through each line and split the content using delimiter
while (getline(file, line))
{
    std::stringstream s(line);
    while(getline(s, val, ','))
        image.m_pixels.push_back(short(std::stoi(val)));
}
file.close(); // Close the File
}

void writeCsv(const char* filename, SImageData& image)
{
    std::fstream file;
    file.open(filename, std::fstream::out);

    std::string line = "", val = "";
    // Iterate through each line and split the content using delimiter
    for(int i = 1 ; i <= image.m_pixels.size() ; i++)
    {
        file << ("%d", image.m_pixels[i-1]);
        if( !(i % image.m_width))
            file << "\n";
        else
            file << ",";
    }
    file.close();
}

int main (int argc, char **argv)
{
    float scale = 4.0f;

    if(argv[2]) scale = int(*argv[2]);

    SImageData srcImage{};
    readCsv(argv[1], srcImage);

    SImageData destImage{};
    ResizeImage(srcImage, destImage, scale);
    writeCsv("C_out.csv", destImage);
    return 0;}

```

Додаток Д – Кольорові зображення термограмм.

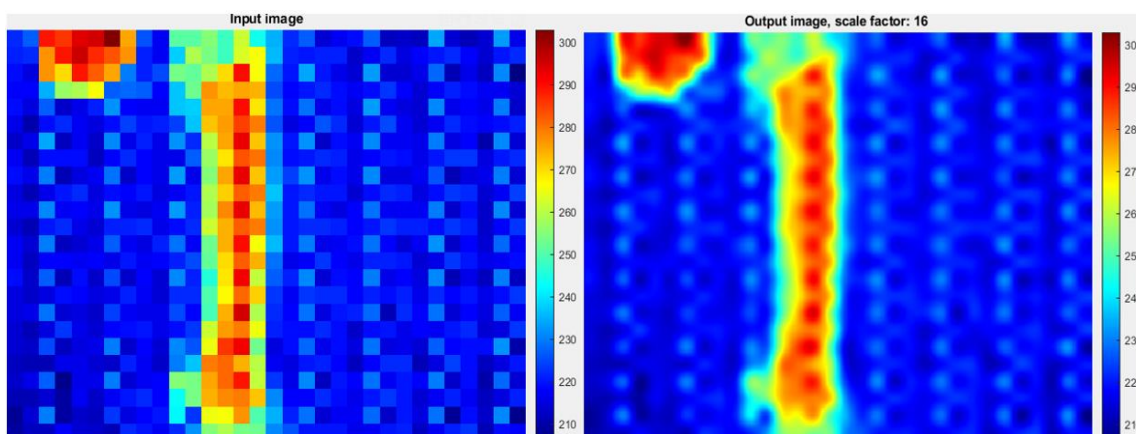


Рисунок Д.1 – Кольорова версія термограмми, інтерпольованої у 16 разів.

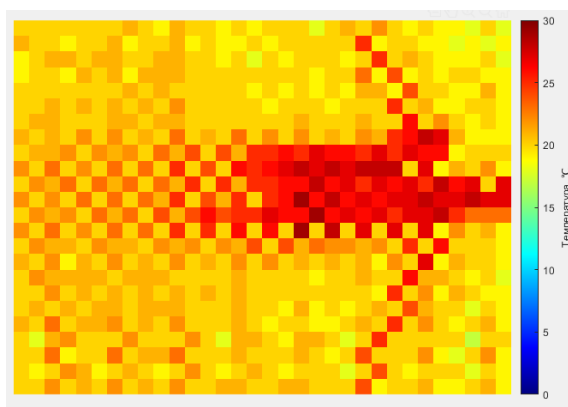


Рисунок Д.2 – Попередня термограмма(отримана з MLX90640, кольорова версія)

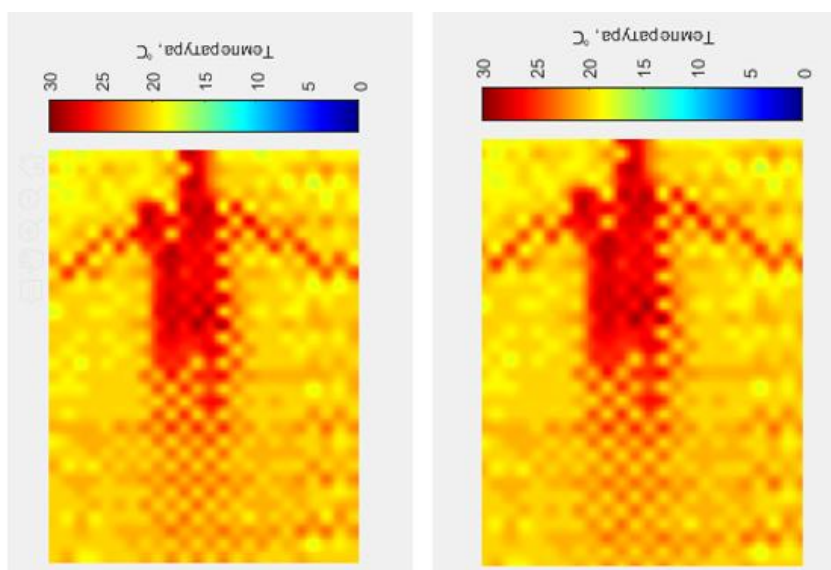


Рисунок Д.2 – Порівняння результатів алгоритму інтерполяції (Matlab реалізація зліва)

Додаток Е – Акт впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Керівник ФОП Сахаров Д. Ю.

Сахаров Д.Ю.
05.06 2019р.

А К Т

впровадження результатів дипломного проекту
виконаного студентом групи ДК-52
кафедри КЕОА ФЕЛ НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
Сахаровим Дмитром Юрійовичем
на тему «Тепловізійний пристрій»

Даний акт складено про те, що результати дипломного проекту «Тепловізійний пристрій» студента групи ДК-52 кафедри КЕОА ФЕЛ НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського» Сахарова Дмитра Юрійовича будуть використанні при розробці виробів напрямку енергоаудиту ФОП Сахаров Д.Ю.

Керівник



Сахаров Д.Ю.

Додаток Ж – Участь у конференціях

XVIII ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ УЧЕНИХ ТА СТУДЕНТІВ

«Наукові розробки молоді на сучасному етапі»

Сахаров Д.Ю. «Тепловізійний пристрій»

УДК 53.087.92

ТЕМА: «ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ ПРИСТРІЙ»

Студент Сахаров Д.Ю., факультет електроніки, гр ДК-52,
Керівник Бондаренко Н.О., ст. викладач

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ

Мета і завдання. Проблема попередження теплових втрат, внаслідок порушень теплоізоляційних характеристик будівель є дуже гострою на сьогодні, оскільки ціна на опалювання невідомо збільшується [1].

Щоб розрізнити об'єкти у кадрі та локалізувати витоки тепла, у тепловізора має бути достатньо велика роздільна здатність. Задача полягає у розробці тепловізора достатньої точності вимірювання температур та роздільної здатності, щоб досягнути мети локалізації теплових витоків у стінах будівель.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес виявлення порушень у теплоізоляції будівель, внаслідок детектування теплових витоків. Предметом дослідження є покращення характеристик тепловізора, збільшення роздільної здатності шляхом апаратного прискорення інтерполяції зображення.

Наукова новизна. Удосконалено метод масштабування та інтерполяції теплової мапи за допомогою апаратного прискорювача інтерполяції. Розроблено систему, що здатна будувати теплову мапу об'єктів середовища.

Результати дослідження. Інфрачервоне випромінювання — електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоною границею видимого світла з довжиною хвилі $\lambda = 700$ нм (частота близько 430 ТГц) [2]. Інфрачервоне (далі ІЧ) випромінювання також називають «тепловим випромінюванням», у зв'язку із залежністю його спектру та інтенсивності від температури а також, сприйняттям його шкірою людини, як відчуття тепла. Довжини хвиль, що випромінюються тілом, залежать від температури нагрівання: чим вищою є температура, тим коротша довжина хвилі та вища інтенсивність випромінювання. Тепловізійні пристрої працюють за принципом конвертації невидимого для ока людини теплового діапазону у видимий, у так звані «псевдо-кольори».

Апаратний прискорювач інтерполяції представляє собою кінцевий автомат, що приймає на вхід кадр H на L пікселів, та за один цикл роботи масштабує його удвічі (кількість пікселів зростає у чотири рази) до параметрів $2*H$ на $2*L$. Якщо бажаний коефіцієнт масштабування більший за 2, та кратний степені двійки, один і той самий кадр обробляється кінцевим автоматом $\log_2 sf$ разів, де sf — scale factor (коефіцієнт масштабування). У ході такого

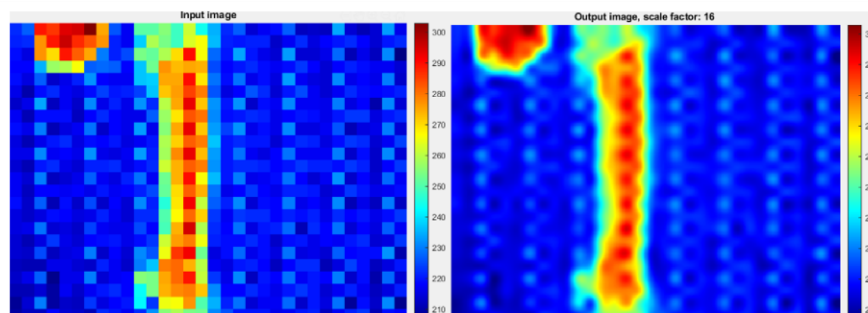


Рис. 1. Вхідний і вихідний (масштабований та інтерпольований) кадри.

збільшення картинка згладжується за використанням інтерполяції кубічними сплайнами [3].

Було побудовано модель, що масштабує кадри у середовищі Matlab. Вона приймає потік кадрів з мікроконтролеру STM32F767ZIT6, до якого під'єднано ІЧ матрицю MLX90640. Остання являє собою масив 32 на 24 інфрачервоних датчиків-пікселів.

Для фізичної реалізації прискорювача інтерполяції у складі тепловізійного пристрою, вирішено використовувати технологію програмованої логічної матриці – FPGA [4], а саме – Intel EP2C20F484C7. У першій ітерації прототипування згенеровано нетліст безпосередньо з Matlab/Simulink моделі. Такий підхід є значно легшим, у порівнянні з RTL описом цифрової схеми на мовах опису цифрової апаратури Verilog або VHDL, проте кінцевий пристрій буде займати дещо більше ресурсів програмованої матриці. Тому у наступних ітераціях прийнято рішення описувати інтерполяційне ядро, що буде розміщено у FPGA за допомогою мови Verilog.

Висновки. У даній роботі описано метод апаратної інтерполяції масштабованих кадрів з тепловізійного пристрою, що побудовано з використанням інфрачервоної матриці MLX90640 та мікроконтролеру STM32F767ZIT6. Подальше удосконалення системи можливе за рахунок оптимізації алгоритмів апаратного інтерполяційного ядра, кращим підбором компонентів для наступних ітерацій прототипування, щоб здешевити кінцевий пристрій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- [1] Збільшення ціни на комунальні послуги в Україні. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bit.ly/2UjPGUy>
- [2] Інфрачервоне випромінювання. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bit.ly/2fJlBB>
- [3] Understanding digital image interpolation. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bit.ly/2UwIWxw>
- [4] Field-programmable gate array. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bit.ly/2UAS39C>

ДОВІДКА

Видана студенту Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського Сахарову Д.Ю. (гр.ДК-52) в тому, що тези його доповіді на тему «ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ ПРИСТРІЙ», прийняті до друку у збірнику тез XVIII Всеукраїнської наукової конференції молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі» (підсекція «Електроніка та електротехніка», 18-19 квітня 2019 р.)

Випуск збірника запланований на липень 2019 р.

Начальник НДЧ



Н.Д. Пруднікова

Додаток И – Тепловізійний пристрій. Перелік елементів

Додаток К – Специфікація